

MESTRADO EM RISCOS, CIDADES E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO  
RAMO: PREVENÇÃO DE RISCOS E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

# Estudo da exequibilidade do método HVSR para aplicações de análise espacial em geologia urbana

Liliana Teixeira

**M**

2017



**Liliana Cristina Peixoto Teixeira**

**Estudo da exequibilidade do método HVSR para aplicações de  
análise espacial em geologia urbana**

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do  
Território, orientada pelo Professor Doutor Carlos Bateira  
e coorientada pelo Professor Doutor Rui Moura

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Setembro de 2017



# Estudo da exequibilidade do método HVSR para aplicações de análise espacial em geologia urbana

Liliana Cristina Peixoto Teixeira

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território, orientada pelo Professor Doutor Carlos Bateira e coorientada pelo Professor Doutor Rui Moura

## Membros do Júri

Professor Doutor José Ramiro Pimenta  
Faculdade de Letras – Universidade do Porto

Professor Doutor Fernando Almeida  
Departamento de Geociências - Universidade de Aveiro

Professor Doutor Rui Moura  
Faculdade de Ciências - Universidade do Porto

Classificação obtida: 17 valores

*Quando eu morrer, rosas brancas*

*Para mim ninguém as corte*

*Quem as não teve na vida*

*Também as não quer na morte*

*Fado de António de Sousa*

*(Ao meu tio Fernando, descansa em paz)*



## Sumário

Agradecimentos.....	9
Resumo.....	10
Abstract .....	11
Índice de figuras .....	12
Índice de gráficos .....	14
Índice de tabelas .....	16
Introdução .....	17
Capítulo 1 – Fundamentação teórica.....	21
1.1. Generalidades sobre a sismologia .....	21
1.2. Ondas sísmicas .....	23
1.2.1. Ondas de volume.....	24
1.2.2. Ondas de superfície .....	25
1.3. Ruído ambiente .....	27
1.4. Efeitos de sítio.....	28
Capítulo 2 – Caracterização geral da área de estudo.....	31
2.1. Enquadramento geográfico .....	31
2.2. Enquadramento geológico.....	33
2.3. Enquadramento sismotectónico.....	35
2.4. Enquadramento geotécnico .....	39
Capítulo 3 – Metodologia e instrumentação.....	43
3.1. Método HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio) .....	43
3.2. Aquisição de dados.....	43
3.2.1. CMG-6TD - Guralp Systems .....	45

3.2.2. SR04S3 Geobox – Sara Electronic Instruments .....	46
3.3.3. Parâmetros de Aquisição .....	47
3.3. Processamento de dados.....	49
3.3.1. Geopsy.....	49
3.3.2. Dinver.....	50
3.3.3. Excel.....	52
3.3.4. ArcGis – ArcMap e ArcScene.....	52
3.4. Teste ao critério de recolha de dados – tempo de gravação .....	54
3.5. Teste á fiabilidade dos equipamentos.....	55
Capítulo 4 – Apresentação dos resultados.....	61
4.1. Resultados – Geopsy .....	61
4.2. Resultados – Dinver .....	72
4.3. Quadro resumo de todos os resultados (Geopsy e Dinver) .....	87
4.4. Mapas de interpolação dos resultados .....	89
4.5. Resultados da modelação de terrenos em profundidade (TIN – Triangulated Irregular Surface) .....	91
4.6. Modelos 3D.....	96
4.7. Correlação com as unidades geotécnicas .....	98
Capítulo 5 – Discussão dos resultados .....	104
Conclusão.....	105
Referências bibliográficas .....	106



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor Rui Moura e Professor Doutor Carlos Bateira, agradeço toda a ajuda, paciência e disponibilidade que me prestaram durante toda a duração do meu projecto e agradeço especialmente ao Professor Rui pela cedência de todo o material necessário para trabalhar neste tema que tanto me fascinou.

Agradeço também à minha família, especialmente aos meus pais Artur Teixeira e Amélia Peixoto, por todo o apoio prestado durante esta fase do meu percurso, agradeço não só todo o apoio moral como agradeço o simples facto de estarem por perto para me ouvirem falar de todas as minhas conquistas e todos os meus percalços. Neste sentido agradeço especialmente também, ao meu irmão Rui e à minha cunhada Cesaltina, agradeço o abrigo que me prestaram para poder estar mais perto do Porto e agradeço todas as intermináveis viagens à estação de comboios.

Agradeço às Mestres Ana Filipa Pacheco e Sofia Venade, toda a amizade, carinho e apoio, não só no desenvolvimento deste projecto como a nível pessoal, as grandes amizades não esmorecem independentemente do rumo que as nossas vidas tomam, obrigada meninas. No ritmo das amizades, agradeço também às mais recentes, Ana Moreira e Mestre Sílvia Aires, que num curto espaço de tempo muito contribuíram na minha caminhada.

Por último, mas não menos importante, de facto será o meu agradecimento mais importante, obrigada ao meu melhor amigo, companheiro de vida e incansável noivo, Estéfano De Oliveira, sem ti não teria conseguido, obrigada.

## Resumo

Localizada no norte de Portugal Continental, a cidade do Porto, caracteriza-se por níveis de sismicidade entre o baixo e o moderado, considerando os registos da sismicidade histórica e instrumental para esta região, e por esta razão não estão presentes estudos locais sobre a ocorrência de efeitos de sítio ou sobre as características da resposta local aos efeitos da acção sísmica. Neste projecto recorreu-se à metodologia HVSR (*horizontal-to-vertical spectral ratio*) para obter informação sobre as frequências fundamentais do solo em diversas áreas da cidade. Este tipo de estudos são fundamentais para se compreender a influência das condições geológicas locais na amplificação das ondas sísmicas. Para orientação da área de estudo utilizou-se a delimitação da bacia hidrográfica do Rio Frio, um rio subterrâneo que atravessa as zonas do Jardim do Carregal, Hospital de Santo António e Jardim das Virtudes tendo sido analisada a área envolvente do Carregal, Cordoaria e Virtudes.

Para tal, foram registados 30 pontos de gravação de ruído ambiente, utilizando para tal dois sismómetros de banda larga. Os resultados obtidos pela metodologia HVSR foram testados e aplicados em questões de análise espacial, recorrendo-se à construção de mapas de interpolação e modelos digitais topográficos. A principal interpretação do estudo esteve relacionada com a comparação entre os resultados de frequência fundamental obtidos e as unidades geotécnicas definidas para a cidade do Porto na Carta Geotécnica do Porto, onde se verificou uma forte relação entre valores de frequência fundamental e grau de resistência do solo.

**Palavras-chave:** geofísica, método HVSR, frequência fundamental, efeitos de sítio, caracterização geotécnica.

## Abstract

Located in the northern part of continental Portugal, the city of Porto is characterized by low-to-moderate levels of seismicity, regarding the analysis of historical seismicity and instrumental records, thus one of reasons for the lack of studies regarding the influence of site effects in this area. In this study, the HVSr technique (horizontal-to-vertical spectral ratio) was used in order to obtain information about the fundamental frequencies of the ground in several parts of the city which was later compared to the geotechnical information presented in the Geotechnical Map of Porto, with the aim of establishing a possible correlation between frequency values and sub-soil geotechnical characteristics. This type of research plays an important role in understanding how local geological characteristics may influence the amplification of seismic waves. The results were also applied to the construction of digital terrain models and other spacial analysis methods, such as interpolations.

For this purpose, one dispersed test campaign was performed within the hydrographic basin of Frio River, an underground river flowing in the areas of Carregal Garden, Santo António Hospital, Cordoaria Garden and Virtudes Garden. This represented a total of 30 recordings of ambient ground noise using two broadband seismometers and the resulted data was used to produce HVSr graphics. From these graphics it was possible to determine the fundamental frequencies ( $f_0$ ) of several points within the city. Resorting to the geotechnical map of the city and having identified the geotechnical units existing in each test place as well as the parameters used to their classification, it was possible to establish a connection between frequency values and substrate competence. The results suggest a strong relation between these parameters, low frequencies relate to softer grounds and as an opposite high frequencies to harder bedrock.

**Keywords:** geophysics, HVSr method, fundamental frequency, site effects, geotechnical characterization.

## Índice de figuras

Figura 1 – Modelo do interior do globo terrestre, englobando as principais descontinuidades e respectivos valores de propagação das ondas P e S (Lima, 1998). .....	23
Figura 2 – Modelo de propagação das ondas P (Mussett & Khan, 2000). .....	24
Figura 3 – Modelo de propagação das ondas S (Mussett & Khan, 2000). .....	25
Figura 4 – Modelo de propagação das ondas Love (Mussett & Khan, 2000). .....	26
Figura 5 – Modelo de propagação das ondas Rayleigh (Mussett & Khan, 2000). .....	26
Figura 6 – Imagem aérea da cidade do Porto com delimitação (a azul) da área amostrada (imagem retirada do Google Earth). .....	31
Figura 7 – Representação do limite da bacia hidrográfica do Rio Frio conjuntamente com a posição de cada ponto amostrado. ....	32
Figura 8 – Representação do declive da área de estudo com representação dos pontos amostrados. ....	33
Figura 9 – Modelo tectono-estratigráfico de Portugal Continental (Ribeiro et al., 1980). .....	33
Figura 10 – Excerto da Carta Geológica de Portugal, folha 9-C (Porto) na escala 1:50 000 (Costa et al., 1957). .....	35
Figura 11 – Esquema do contexto tectónico de Portugal (LNEC, 2016). .....	36
Figura 12 – Carta Neotectónica de Portugal Continental elaborada por Cabral & Ribeiro, 1989 (Lima, 1998). .....	37
Figura 13 – Modelo geodinâmico de margem continental activa de Cabral & Ribeiro, 1989 (Lima, 1998). .....	38
Figura 14 – Mapas de Intensidade Sísmica e Sismicidade Histórica para Portugal Continental (Atlas do Ambiente, 2016). .....	39
Figura 15 – Carta Geotécnica do Porto, na escala 1: 10 000 (CMP, 2003). .....	40
Figura 16 – Legenda da Carta Geotécnica do Porto (CMP, 2003). .....	41
Figura 17 – Excerto da Carta Geotécnica do Porto (CMP, 2003) com foco na área amostrada, incluindo a localização de cada ponto recolhido. ....	42
Figura 18 – Esquema exemplificativo dos três eixos de direcção do movimento e imagem do sismógrafo de banda larga CMG-6TD. ....	45
Figura 19 – Sismógrafo SR04S3 Geobox. ....	47
Figura 20 – Registo da gravação de ruído ambiente, no software Geopsy. ....	49
Figura 21 – Menu de configuração para a obtenção do gráfico HVSR, software Geopsy. ....	50
Figura 22 – Gráfico HVSR obtido e janela de leitura de resultados, software Geopsy. ....	50
Figura 23 – Menu de processamento do software Dinver, com representação da curva de elipticidade. ....	51

Figura 24 – Menu de configuração dos parâmetros de criação dos gráficos velocidade vs. profundidade, software Dinver.....	51
Figura 25 – Curvas HVSR para os ficheiros de 10 min. (1) e 30 min. (2), respectivamente. ....	55
Figura 26 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado. ....	89
Figura 27 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores máximos de amplitude das ondas nos picos de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado.....	90
Figura 28 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores velocidade de propagação de S na primeira camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado. ....	91
Figura 29 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores de velocidade de propagação de S na segunda camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado.....	92
Figura 30 – Mapa de interpolação dos resultados dos valores de profundidade para o limite entre a primeira e a segunda camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado.....	93
Figura 31 – Mapa de interpolação dos resultados dos valores de profundidade para o limite entre a segunda e a terceira camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado. ....	94
Figura 32 – Modelo digital de topografia representativo dos níveis de cota superficiais da área amostrada. ....	96
Figura 33 – Modelo digital de topografia representativo dos níveis de cota relativos á remoção da camada de solo mais superficial. ....	96
Figura 34 – Modelo digital de topografia representativo dos níveis de cota relativos à remoção da primeira e segunda camada de solo.....	97
Figura 35 – Diferentes ângulos de visualização dos modelos digitais topológicos. Os modelos superiores correspondem ás figuras 33 e 34, (da esquerda para a direita). Os modelos inferiores incluem a localização dos vários pontos amostrados (barras verdes)e pode observar-se o espaço vazio entre limites de camada que corresponde à espessura de cada camada de solo. ....	98
Figura 36 – Complemento de visualização de vários ângulos dos modelos digitais topológicos apresentados nas figuras 33 e 34.....	99

## Índice de gráficos

Gráfico 1 – Gráfico HVSR do ponto 1.....	61
Gráfico 2 – Gráfico HVSR do ponto 2.....	61
Gráfico 3 – Gráfico HVSR do ponto 3.....	62
Gráfico 4 – Gráfico HVSR do ponto 4.....	62
Gráfico 5 – Gráfico HVSR do ponto 5.....	62
Gráfico 6 – Gráfico HVSR do ponto 6.....	63
Gráfico 7 – Gráfico HVSR do ponto 7.....	63
Gráfico 8 – Gráfico HVSR do ponto 8.....	63
Gráfico 9 – Gráfico HVSR do ponto 9.....	64
Gráfico 10 – Gráfico HVSR do ponto 10.....	64
Gráfico 11 – Gráfico HVSR do ponto 11.....	64
Gráfico 11 – Gráfico HVSR do ponto 11.....	64
Gráfico 12 – Gráfico HVSR do ponto 12.....	64
Gráfico 12 – Gráfico HVSR do ponto 12.....	65
Gráfico 13 – Gráfico HVSR do ponto 13.....	65
Gráfico 14 – Gráfico HVSR do ponto 14.....	65
Gráfico 15 – Gráfico HVSR do ponto 15.....	66
Gráfico 16 – Gráfico HVSR do ponto 16.....	66
Gráfico 17 – Gráfico HVSR do ponto 17.....	66
Gráfico 18 – Gráfico HVSR do ponto 18.....	67
Gráfico 19 – Gráfico HVSR do ponto 19.....	67
Gráfico 20 – Gráfico HVSR do ponto 20.....	67
Gráfico 21 – Gráfico HVSR do ponto 21.....	68
Gráfico 22 – Gráfico HVSR do ponto 22.....	68
Gráfico 23 – Gráfico HVSR do ponto 23.....	68
Gráfico 24 – Gráfico HVSR do ponto 24.....	69
Gráfico 25 – Gráfico HVSR do ponto 25.....	69
Gráfico 26 – Gráfico HVSR do ponto 26.....	69
Gráfico 27 – Gráfico HVSR do ponto 27.....	70
Gráfico 28 – Gráfico HVSR do ponto 28.....	70
Gráfico 29 – Gráfico HVSR do ponto 29.....	70
Gráfico 30 – Gráfico HVSR do ponto 30.....	71
Gráfico 31 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 1.....	72
Gráfico 32 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 2.....	72
Gráfico 33 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 3.....	73

Gráfico 34 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 4.....	73
Gráfico 35 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 5.....	74
Gráfico 36 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 6.....	74
Gráfico 37 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 7.....	75
Gráfico 38 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 8.....	75
Gráfico 39 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 9.....	76
Gráfico 40 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 10.....	76
Gráfico 41 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 11.....	77
Gráfico 42 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 12.....	77
Gráfico 43 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 13.....	78
Gráfico 44 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 14.....	78
Gráfico 45 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 15.....	79
Gráfico 46 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 16.....	79
Gráfico 47 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 17.....	80
Gráfico 48 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 18.....	80
Gráfico 49 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 19.....	81
Gráfico 50 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 20.....	81
Gráfico 51 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 21.....	82
Gráfico 52 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 22.....	82
Gráfico 53 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 23.....	83
Gráfico 54 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 24.....	83
Gráfico 55 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 25.....	84
Gráfico 56 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 26.....	84
Gráfico 57 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 27.....	85
Gráfico 58 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 28.....	85
Gráfico 59 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 29.....	86
Gráfico 60 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 30.....	86

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Resumo das principais fontes de ruído ambiente (adaptado de Gutenberg, 1958 em Bonnefoy-Claudet et al.,2006). .....	28
Tabela 2 – Total de pontos analisados no decorrer do projecto com referência espacial ao local de recolha de dados (Local) bem como as coordenadas do ponto (x, y).....	44
Tabela 3 – Parâmetros de aquisição para gravações de ruído ambiente de boa qualidade para a construção de gráficos H/V (traduzido de: SESAME, 2005).....	48
Tabela 4 – Recomendações de tempos de gravação para o registo de ruído ambiente (SESAME, 2005). .....	54
Tabela 5- Comparação dos resultados obtidos no software Geopsy e Dinver em pontos repetidos, amostrados com equipamentos diferentes. ....	57
Tabela 6 – Compilação em quadro, dos principais resultados obtidos através dos softwares Geopsy e Dinver.....	87
Tabela 7 – Quadro de correlação entre os valores de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado e o valor expectável para a unidade geotécnica cartografada, escala de cores graduada (vermelho – má correlação, laranja – correlação intermédia, verde – boa correlação). .....	101



## Introdução

A presente dissertação insere-se no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território leccionado na Faculdade de Letras da Universidade do Porto, mas a escolha do presente tema teve como base a intenção de relacionar a componente de Riscos Naturais desenvolvida ao longo do 1º ano deste ciclo de estudos com a minha formação anterior, nomeadamente a Licenciatura em Geologia que frequentei na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Durante a Licenciatura desenvolvi um forte interesse pelos Riscos Geológicos e pela Prospekção Geofísica, tendo estas duas unidades curriculares sido leccionadas pelo Professor Doutor Rui Moura. Interesse este, que posteriormente me levou a desenvolver o estágio de licenciatura “Análise dos registos sísmicos do Instituto Geofísico da Universidade do Porto” sob orientação da Professora Doutora Helena Sant’Ovaia e do Professor Doutor Rui Moura e que me permitiu pela primeira vez o contacto com equipamento sísmico (sismógrafos, sismogramas, etc.), permitiu conhecer e compreender o seu funcionamento e também entender o panorama geral no que diz respeito à sismicidade histórica e actual em Portugal Continental e mais especificamente na cidade do Porto.

Por outro lado, durante o 1º ano de Mestrado tive a possibilidade de aprofundar conhecimentos sobre os Riscos Naturais, nomeadamente na unidade curricular de Riscos e Ordenamento do Território, leccionada pelo Professor Doutor Carlos Bateira, onde explorei temas relacionados com métodos geofísicos na avaliação da instabilidade de vertentes. Este ano lectivo foi fundamental para o entendimento do que é o Ordenamento e Planeamento do Território, o quanto é importante conhecer e compreender os eventos naturais para uma correcta prevenção e mitigação, mas também conhecer e saber como se comporta o território em cada local dadas as suas características naturais e não-naturais. Neste sentido a multidisciplinidade revela-se um requisito importante para a obtenção de informação sobre determinado local, especialmente no que diz respeito à construção de cartografia tendo em vista a prevenção do risco.

A densificação da ocupação humana por todo o globo e a consequente urbanização em massa tem vindo cada vez mais a desafiar os conhecimentos da engenharia e da geotecnia, levando a construções cada vez mais elaboradas e obrigando à utilização de terrenos nem sempre com condições favoráveis para albergar essas mesmas construções.

Por outro lado surge frequentemente a necessidade de reavaliar as características de territórios já densamente ocupados, este facto desafia novamente os cientistas e investigadores a encontrarem novas metodologias de intervenção passiva, que incorram em menos perturbação dos terrenos e que não condicionem as populações já ali estabelecidas.

A escolha do tema a dissertar teve em conta as dificuldades e inconvenientes inerentes à utilização de métodos de prospecção geofísica em ambientes urbanos. Neste sentido, surgiu a oportunidade de realizar ensaios para a recolha de dados relativos ao ruído natural do solo através da metodologia HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio), método este, que é maioritariamente utilizado para estudos de avaliação de *efeitos de sítio*.

Os sismos de Michoacan em 1985, no México, Valparaíso também em 1985, no Chile e Kobe em 1995, no Japão, são apenas três exemplos de sismos com diferentes magnitudes ( $M_s = 8.1$ ,  $M_w = 8$  e  $M_w = 6.9$  respectivamente) que foram alvo de estudos de avaliação de *efeitos de sítio*. Em todos os casos verificou-se que as intensidades sentidas ao longo das cidades e aldeias no raio de acção do sismo não estavam de acordo com o que seria expectável, quanto mais longe do epicentro menor deveria ser a intensidade registada em cada local e este facto nem sempre se verificou. Um exemplo dessa discordância foi precisamente em alguns locais a vários quilómetros de distância do epicentro registaram-se intensidades semelhantes ou superiores a locais próximos deste. Este fenómeno potenciou o estudo do comportamento dos solos em resposta a eventos sísmicos e levou à conclusão de que determinadas características inerentes a cada local potenciam a amplificação das ondas sísmicas e desta forma geram graus de destruição muito heterogéneos e imprevisíveis, a isto se designa por *efeitos de sítio*.

Por vezes, o edifício em que nos encontramos, vibra ligeiramente. Isto acontece, por exemplo, quando o edifício se encontra localizado junto a uma via rodoviária e naquele momento passa nessa via um veículo pesado. Este acontecimento designa-se por ressonância e o que acontece é que a passagem daquele determinado veículo provocou a propagação de um conjunto de vibrações através do solo em que algumas dessas ondas vibratórias correspondem à frequência exacta em que os materiais do edifício respondem e, portanto, estes vibram. Na verdade, cada veículo a transitar naquela via, dependendo da sua massa, a velocidade a que se desloca e a força de atrito exercida pelo pavimento, provoca um conjunto de ondas vibratórias que se propagam pelo solo e cada uma dessas ondas vibratórias apresenta frequências e amplitudes distintas. Mas, de facto, apenas as ondas emitidas pelo veículo pesado que correspondem à frequência necessária para

provocar a resposta dos materiais no edifício resultam no efeito da ressonância.

O efeito de ressonância num edifício durante um sismo, ou para qualquer outra construção, é um factor de risco para o edifício e para as pessoas que nele se encontrem pois o facto de os materiais que o compõe se encontrarem em tal situação, em que o efeito vibratório do solo repercute com maior intensidade através da construção, afecta a sua estabilidade estrutural e portanto aumenta o risco de ocorrência de danos nesse determinado edifício. Existem regulamentos de segurança para as construções que ditam as linhas gerais de como um edifício deve ser preparado para suportar estes e outros efeitos, no entanto, e como é o caso da legislação portuguesa, nem todos os aspectos são considerados. A maioria dos estudos efectuados sobre a sismicidade em determinado local, têm por base registos de intensidade observados em eventos passados, o que significa que as condições locais em cada ponto não são efectivamente confirmadas.

O Decreto-lei nº 235/83 de 31 de Maio (Regulamento de segurança e acções para as estruturas de edifícios e pontes) é o documento regulador que prevê a segurança estrutural dos edifícios. Neste documento está previsto o estudo de diversos factores que ameaçam a estabilidade de uma estrutura, como por exemplo, a acção do vento, da neve, dos sismos, etc., pode ler-se sobre as considerações da acção dos sismos no capítulo VII artigos 28º a 32º. No entanto, apesar de todos os cuidados dedicados a esta problemática existe um factor que permanece fora do espectro de considerações, como se pode ler em nota no documento:

*“Na quantificação da acção dos sismos apenas são tidas em conta as acções vibratórias transmitidas pelo terreno à estrutura. Os sismos podem, no entanto, provocar nos terrenos alterações estruturais (roturas, liquefacção de camadas arenosas, movimentos entre bordos de falhas activas) de que resultem deslocamentos importantes, com graves consequências para as construções. Por outro lado, disposições peculiares da estrutura dos terrenos, nomeadamente a existência de camadas horizontais de grande extensão, podem provocar amplificações selectivas da intensidade das vibrações sísmicas em determinadas bandas de frequência; situações deste tipo não foram também tidas em conta na quantificação da acção dos sismos.”*

Isto significa que o valor de amplificação que um terreno pode apresentar em cada local não é tido em conta aquando da implementação de uma estrutura e isto pode resultar num maior grau de danos na sequência de um evento sísmico. Embora existam já em Portugal alguns estudos de zonamento sísmico, inclusive através do método HVSr, como é o caso do Centro Histórico de Lagos, a baixa Lisboa ou a cidade de Angra do

Heroísmo na Ilha Terceira nos Açores, não foi localizado qualquer estudo baseado nesta técnica na cidade do Porto.

Para efeitos desta dissertação o objectivo não foi o de efectuar um estudo de “microzonagem sísmica” semelhante aos referidos anteriormente, uma vez que para isso seria necessário a complementaridade com outras formas de análise para um grau de confiança mais elevado, mas procurou-se explorar a aplicabilidade do método HVSR e a potencialidade dos resultados, fomentando de qualquer das formas, uma base de dados a ser utilizada num futuro estudo completo de microzonamento sísmico para a cidade do Porto.

A escolha do local analisado partiu do interesse despertado por determinados elementos presentes na área de estudo (como por exemplo, a existência de um túnel, o Túnel de Ceuta, e a topografia acentuada de um jardim, o Jardim das Virtudes) e na tentativa de observar se existe influência destes elementos nas características naturais do terreno. A presença de equipamentos de serviço público como a existência do Hospital de Santo António, o Tribunal da Relação do Porto e a Reitoria da Universidade do Porto, também justificam a escolha deste local. A área de estudo foi delimitada por aquilo que se pensa ser a bacia hidrográfica do Rio Frio (ou ribeira das Virtudes ou do Carregal) localizado na cidade do Porto e que nasce na zona da rua da Torrinha e atravessando o jardim do Carregal e o jardim das Virtudes desaguando nas imediações do edifício da Alfândega. Outrora rio com leito à superfície, actualmente todo o seu trajecto é subterrâneo e algo impreciso.

# Capítulo 1 – Fundamentação teórica

## 1.1. Generalidades sobre a sismologia

A Sismologia é o ramo da geologia que estuda os sismos, as suas causas e os seus efeitos. A ocorrência de sismos, ou como também podem ser designados – terremotos, suscitaram desde sempre o interesse do Homem que procurou de diversas formas encontrar uma explicação para tal evento.

Das sociedades mais antigas chegam-nos diversos mitos e crenças religiosas como forma de explicação de um terremoto. Por exemplo, no Japão, local muito afectado ao nível da sismicidade, as populações acreditavam que os abalos do solo por eles sentidos resultavam da movimentação de um gigante peixe-serpente que se deslocava por baixo das ilhas (Lima, 1998). Mas como esta, existem muitas outras crenças mitológicas/divinas que associavam os sismos ao movimento de grandes criaturas ou então a um castigo atribuído por alguma divindade.

No entanto, ao longo dos tempos surgiram algumas teorias de base mais científica que procuravam relacionar os elementos naturais com a ocorrência dos sismos. Na Grécia Antiga, Thales (624-545) acreditava que a Terra, na forma de um disco, assentava sobre uma base de água e a movimentação mais atribulada destas águas profundas provocaria então os abalos de terra; Anaxágoras (500-428) considerou como causa dos sismos, o choque entre nuvens de vapor circulando pelo interior de grandes cavernas no subsolo que provocariam grandes fogos, tal como acontece na atmosfera; mais tarde, Aristóteles (384-322) procurou relacionar a ocorrência de erupções vulcânicas com a ocorrência de sismos (Lima, 1998).

De facto, só nos finais do séc. XIX e inícios do séc. XX, se começou a relacionar a existência de fracturas ou falhas nas rochas com a origem dos sismos e vice-versa, a ocorrência de sismos com a formação das falhas. Nomeadamente, os estudos de H. F. Reid sobre o grande terremoto de São Francisco (na Califórnia, EUA) em 1906, provocado pela falha de Santo André (no mesmo estado), é que vieram dar solidez a este novo conhecimento sobre os sismos – as rochas atravessadas por uma falha ou sob a acção de pressões externas vão acumulando tensão ao longo dos anos até ao limite da sua resistência, atingindo o seu ponto de ruptura dá-se uma libertação brusca de energia sob a forma de ondas sísmicas (Torre de Assunção, 1973).

Desde então, e com a evolução tecnológica que permitiu o desenvolvimento de equipamento mais preciso, sensível e fiável, a Sismologia floresceu como ciência apoiada nos conhecimentos da física e da geofísica. Como resultado surgiram novas e importantes descobertas sobre o nosso planeta e a Sismologia passou a abarcar um alargado número de aplicações.

Um dos principais contributos da sismologia diz respeito ao conhecimento do interior do globo terrestre. Sendo o raio da terra cerca de 6378 km (Lima, 1998) e a capacidade de observação directa limitada até cerca de 10 km a partir da superfície (máxima profundidade atingida por sondagens) (Torre de Assunção, 1973), foi necessário recorrer a métodos de observação indirectos para se obterem informações sobre o interior da terra, a sua composição e estrutura.

Dentro das várias hipóteses de observação indirecta, nomeadamente, o estudo da densidade terrestre, do magnetismo, comparação com meteoritos e, finalmente, o estudo da propagação das ondas sísmicas (Torre de Assunção, 1973), este último é o que se passa a explicitar neste texto.

Se considerarmos o interior do globo terrestre uma massa uniforme então duas estações sísmicas com igual distância ao epicentro de um sismo deveriam registar os mesmos tempos de chegada das ondas sísmicas, mas tal facto não se observa. Estudando as propriedades físicas das ondas constatou-se que a velocidade e a forma de propagação de uma determinada onda sísmica sofre alterações de acordo com as diferentes características físicas do meio que atravessa. Ainda, através da análise de registos sísmicos, designados sismogramas, foi também possível identificar e constatar as variações de velocidade das diferentes ondas sísmicas em profundidade. Com tudo isto, foi possível concluir que o interior do globo terrestre não é uniforme nem tão pouco composto por uma massa de igual densidade, composição ou espessura (Lima, 1998).

Este conhecimento permitiu fundamentar o modelo de constituição do globo terrestre actual dividido em diversas camadas de diferentes características e identificar as diferentes descontinuidades que constituem essas separações, como se pode observar na figura 1.

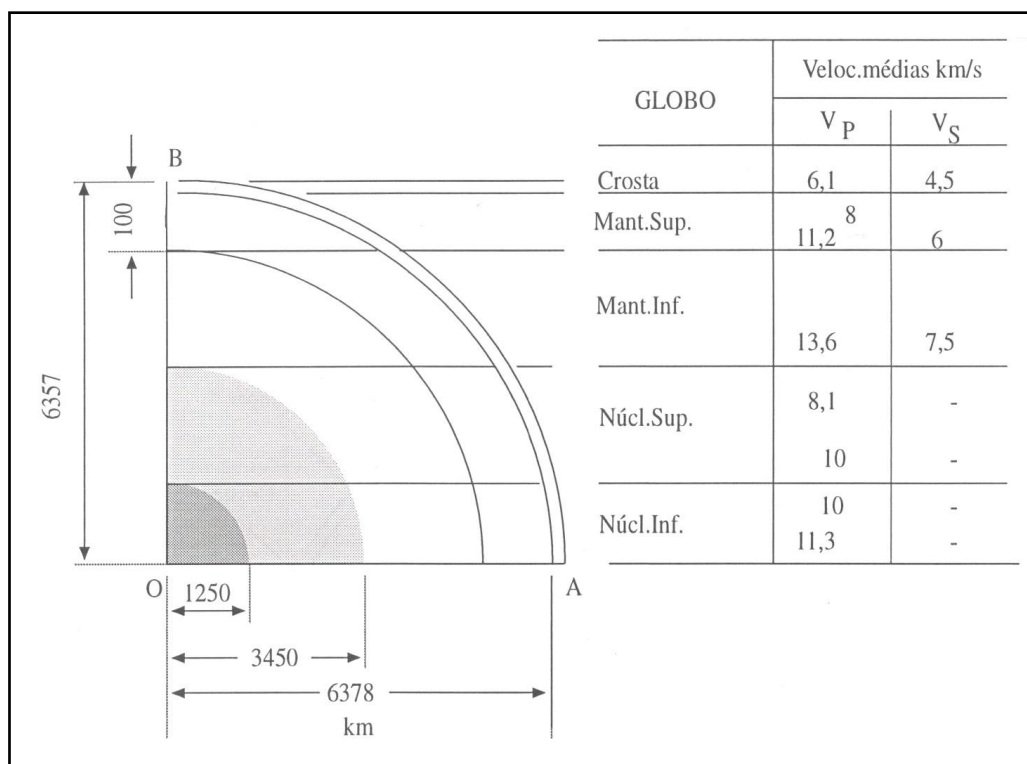


Figura 1 – Modelo do interior do globo terrestre, englobando as principais descontinuidades e respectivos valores de propagação das ondas P e S (Lima, 1998).

## 1.2. Ondas sísmicas

Os sismos podem ter diversas origens, podem ocorrer na sequência do deslocamento natural das placas tectónicas, pelo movimento de uma falha no interior das ditas placas, pela actividade vulcânica, pelo desabamento de cavernas e grutas no subsolo e, finalmente, pela detonação de dispositivos artificiais (por exemplo: bombas nucleares, detonação de cargas explosivas numa mina, etc.). Um factor comum a todas estas possibilidades é libertação de um conjunto de ondas no momento do evento, seja ele natural ou artificial.

As ondas sísmicas são ondas mecânicas, ou seja, são a propagação de uma perturbação que transporta energia ao longo de um ou vários meios materiais. No caso das ondas sísmicas, a sua propagação dá-se a partir do foco (local em profundidade onde se dá a libertação de energia) e também, do epicentro (local à superfície directamente na vertical do foco).

Como qualquer onda, as ondas sísmicas, são caracterizadas pelo seu:

- Comprimento de onda: distância entre dois pontos consecutivos de uma onda no mesmo ponto de oscilação (crista ou vale);
- Período: intervalo de tempo entre a emissão de dois pulsos de energia;
- Frequência: número de oscilações por determinada unidade de tempo;
- Amplitude: máximo afastamento da onda relativamente à posição média de oscilação.

Dependendo do seu ponto de origem, as ondas sísmicas, são divididas em duas categorias (Lima, 1998):

- Ondas de corpo (ou de volume): a sua propagação dá-se a partir do foco;
- Ondas de superfície: a sua propagação dá-se a partir do epicentro.

#### 1.2.1. Ondas de volume

De acordo com o movimento das partículas de um determinado meio, durante a propagação de uma onda, distinguem-se dois tipos de ondas de volume: as ondas P (ou longitudinais) e as ondas S (ou transversais).

As ondas longitudinais propagam-se na mesma direcção da propagação da onda e conferem movimentos de compressão e dilatação ao meio onde se deslocam. Propagam-se através de todos os meios, sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos. São também as ondas com maior velocidade de propagação, o que deu origem à sua designação, P (primárias), pois são as primeiras a ser registadas após um evento sísmico (Lima, 1998).

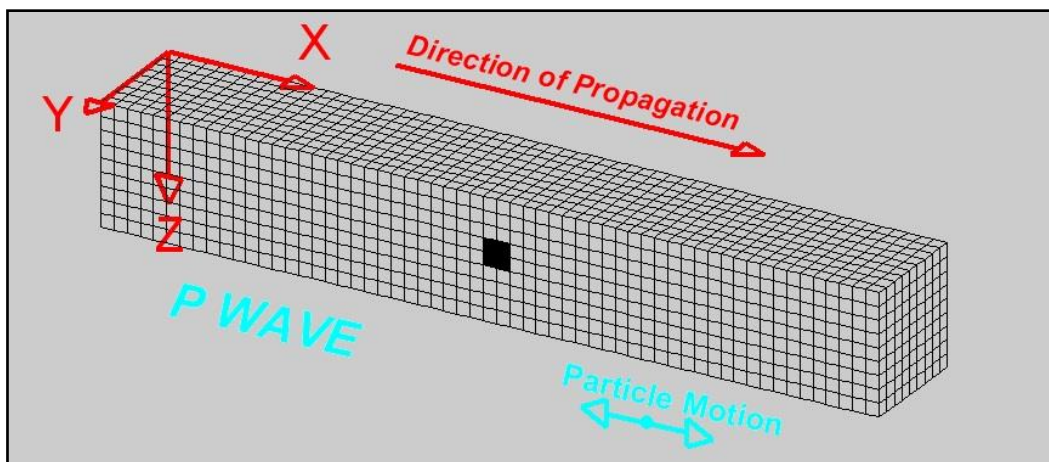
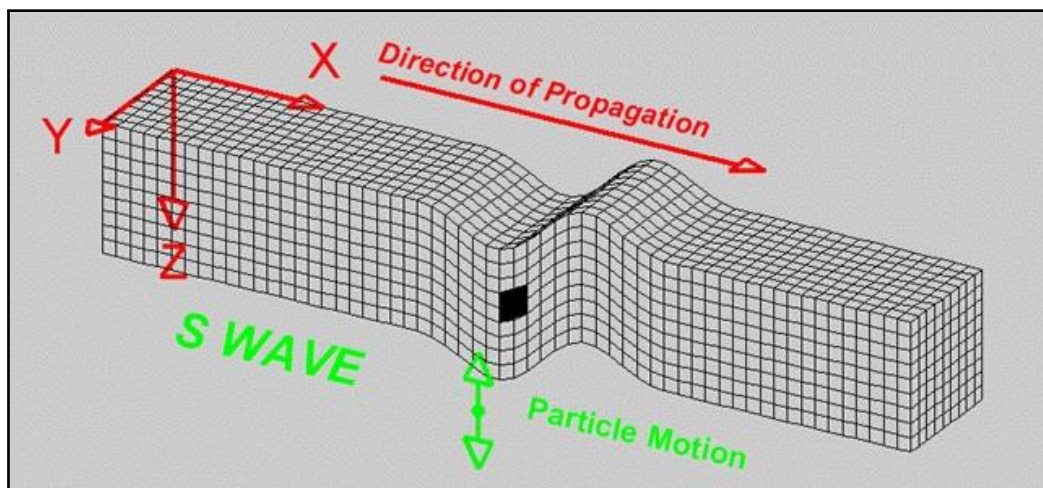


Figura 2 – Modelo de propagação das ondas P (Mussett & Khan, 2000).



As ondas transversais, também conhecidas como ondas de corte, propagam-se perpendicularmente ao sentido de propagação da onda no plano vertical, conferindo deformações e distorções ao meio que atravessam. Ao contrário das ondas P, as ondas S, apenas se propagam em meios sólidos. A sua velocidade de propagação é inferior à das ondas P, são também designadas por ondas S (secundárias) pois são registadas em segundo lugar relativamente às ondas P (Lima, 1998).



*Figura 3 – Modelo de propagação das ondas S (Mussett & Khan, 2000).*

### **1.2.2. Ondas de superfície**

Como já foi referido, as ondas de superfície, propagam-se a partir do epicentro de um sismo e como tal, propagam-se exclusivamente perto da superfície da crosta terrestre. Estas ondas caracterizam-se por velocidades de propagação mais lentas relativamente às ondas de volume e por períodos de oscilação mais longos. Por este motivo, as ondas superficiais, provocam as maiores perturbações ao nível do solo e são as mais perigosas para as estruturas antrópicas. Distinguem-se dois tipos de ondas superficiais: ondas Love e ondas Rayleigh (Lima, 1998).

As ondas Love propagam-se perpendicularmente à direcção de propagação da onda, tal como as ondas S, mas neste caso propagam-se no plano horizontal, paralelamente à superfície.

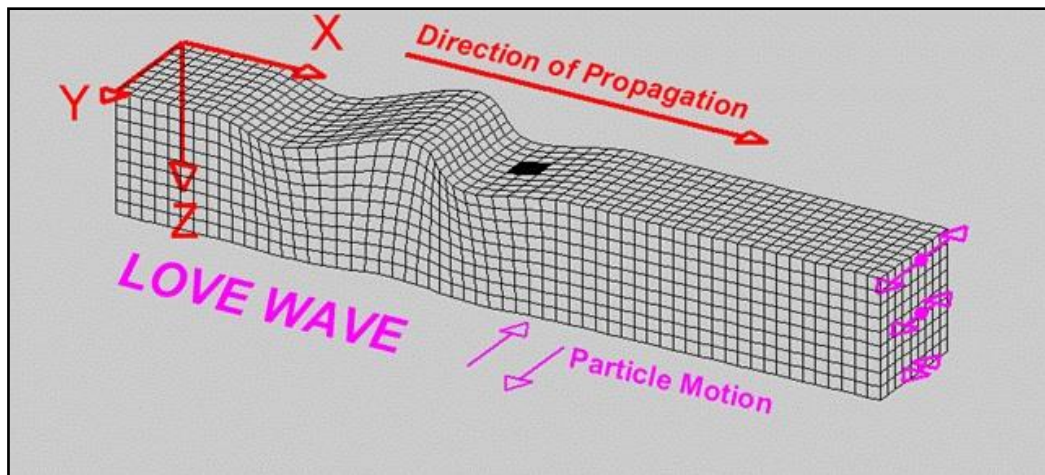


Figura 4 – Modelo de propagação das ondas Love (Mussett & Khan, 2000).

As ondas Rayleigh propagam-se de forma elíptica conferindo um movimento retrógrado relativamente ao sentido de propagação da onda.

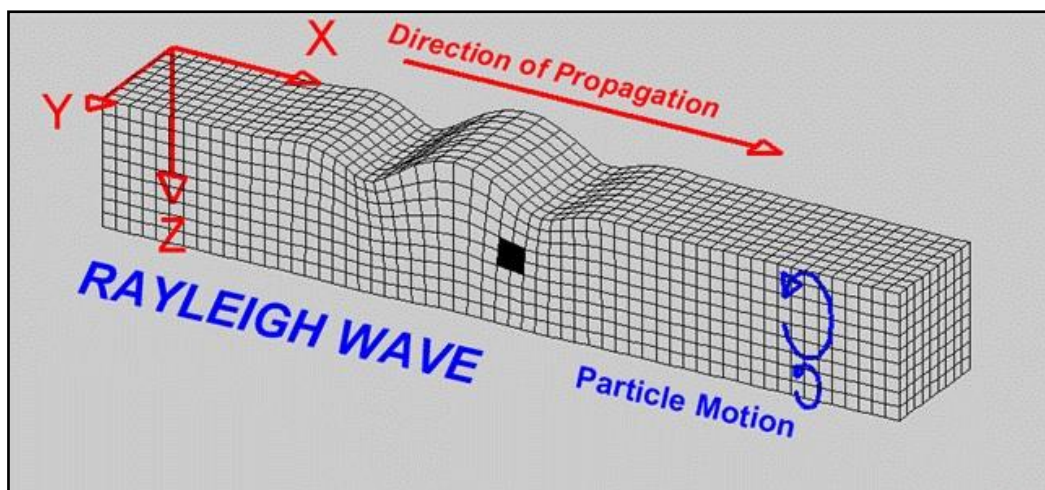


Figura 5 – Modelo de propagação das ondas Rayleigh (Mussett & Khan, 2000).

### 1.3. Ruído ambiente

O subsolo é constantemente atravessado por um campo de ondas que escapam à nossa capacidade de percepção e que é normalmente designado como ruído natural do solo (Bonney-Claudet *et al.*, 2006).

O ruído natural do solo, por vezes designado como ruído ambiente, foi inicialmente percebido como um factor incómodo na observação e interpretação de dados sísmicos. No entanto, já em 1872, Bertelli conseguiu, através da observação directa do movimento de um pêndulo e das suas oscilações mediante a ocorrência de determinados eventos meteorológicos, estabelecer uma correlação entre o “ruído” observado nos registos sísmicos e as alterações da pressão atmosférica. Desde esta altura e até 1950 vários autores foram constatando a relação entre o ruído sísmico e eventos meteorológicos, documentando diferentes fontes na origem do ruído ambiente (Bonney-Claudet *et al.*, 2006).

Mais tarde, quer com a evolução científica da sismologia, quer com a evolução tecnológica dos equipamentos para registo sísmico, vários investigadores procuraram aplicar a utilização deste ruído a estudos concretos, começando então o desenvolvimento de técnicas de análise baseadas no estudo do ruído ambiente. Deste período de desenvolvimento metodológico surgiram várias aplicações para a o estudo do ruído ambiente, o microzonamento sísmico é considerado a aplicação mais importante deste conjunto (Bonney-Claudet *et al.*, 2006) e trata-se da caracterização da resposta local face à acção sísmica. A metodologia aplicada neste trabalho, a técnica HVSr, surgiu nesta fase e foi desenvolvida precisamente para o estudo do microzonamento sísmico em vários locais no Japão (Nakamura, 2008).

O ruído ambiente é então a base da metodologia HVSr e importa perceber a sua origem e composição. Em termos de origem, o ruído ambiente, divide-se em duas categorias: origem natural e origem antrópica. Os ruídos de origem natural designam-se por microssismos, enquanto os ruídos de origem antrópica se designam por microtremores (Bonney-Claudet *et al.*, 2006). A distinção entre microssismos e microtremores faz-se de acordo com a frequência das ondas, sendo assim, abaixo de 1 Hz as fontes de ruído são de origem natural, entre 1 a 5 Hz são tanto naturais como antrópicas, e acima de 5 Hz as fontes do ruído são de origem antrópica (Tabela 1).

*Tabela 1 – Resumo das principais fontes de ruído ambiente (adaptado de Gutenberg, 1958 em Bonnefoy-Claudet et al., 2006).*

Fonte do ruído sísmico	Intervalo de frequências
Ondas oceânicas junto à linha de costa	0.05 - 0.1 Hz
Monções/perturbações meteorológicas de grande escala	0.1 - 0.25 Hz
Ciclones sobre o oceano	0.3 - 1 Hz
Condições meteorológicas de escala local	1.4 - 5 Hz
Sismos de origem vulcânica	2 - 10 Hz
Ruído urbano	1 - 100 Hz

Relativamente á composição do ruído ambiente não há consenso científico sobre a real contribuição ou proporção de ondas de volume e ondas de superfície. No entanto, para vários autores, a aplicação do método HVSR faz-se assumindo que o ruído ambiente é maioritariamente composto por ondas Rayleigh (Konno & Ohmachi, 1998).

#### **1.4. Efeitos de sítio**

Na análise do risco sísmico é muito importante estudar o comportamento tectónico de um território, identificar as principais estruturas geradoras de sismicidade e conhecer as características e comportamento dos terrenos ao nível local, e com base nisto construir cartografia para a identificação das principais áreas afectadas e adequar os planos de intervenção e mitigação.

Na ocorrência de um evento sísmico é esperado que as populações mais próximas do epicentro sejam aquelas que registam os maiores valores de intensidade sísmica, no entanto isto nem sempre se verifica. Como já foi referido na introdução deste trabalho, existem casos onde se verificou incongruências entre a relação distância ao epicentro – intensidade sísmica.

Durante a sua propagação, as ondas sísmicas, são influenciadas pelo meio onde se deslocam e por condições geológicas locais, por vezes, essas condições locais alteram as propriedades da onda, mais especificamente, aumentam a amplitude da onda e isto resulta

num incremento da intensidade de vibração das partículas do solo (PNSN, 2016). Este fenómeno é designado por efeitos de sítio.

As propriedades inerentes a cada local que podem levar à amplificação das ondas sísmicas são as seguintes (PNSN, 2016):

- Existência de uma bacia sedimentar, o que provoca a diminuição da velocidade de propagação das ondas e provoca a reflexão da onda nos espaços vazios aumentando assim a amplitude da onda;
- Existência de uma camada de solo pouco compacta, o que leva a um efeito semelhante ao citado no ponto anterior, a velocidade de propagação diminui e aumenta a amplitude da onda;
- Espessura da camada de solo, uma camada de solo sedimentar, ou solo pouco compacto, pouco espessa terá pouca influência no efeito de amplificação da onda mas uma camada sedimentar muito espessa gera o efeito semelhante ao da existência de uma bacia sedimentar;
- Topografia do terreno, alguns estudos demonstraram uma maior intensidade de vibração de áreas com declive acentuado relativamente a locais próximos de topografia menos acentuada.

Ainda considerando a topografia de um terreno e a sua contribuição para a amplificação das ondas sísmicas, é possível distinguir diferentes graus de amplificação para diferentes tipos de irregularidades topográficas. Para casos de estruturas superficiais (escarpas, cristas, desfiladeiros, falésias, etc.) o efeito de amplificação das ondas sísmicas ocorre de forma mais localizada, no entanto, para estruturas sub-superficiais (falhas, vales ou bacias sedimentares, etc.) o efeito de amplificação verifica-se para uma área significativamente maior (Faccioli *et al.*, 2002).

Existem diversos estudos onde se recorreu à utilização do método HVSR para a avaliação dos efeitos de sítio, é exemplo disso o estudo de avaliação de efeitos de sítio na bacia sedimentar de Santiago do Chile, no Chile (Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2008), o estudo de efeitos de sítio na cidade de Thessaloniki, na Grécia (Panou *et al.*, 2005) e o estudo dos efeitos de sítio relativamente às áreas escarpadas na cidade de Batu, na Indonésia (Warnana *et al.*, 2011). Estes estudos são um bom exemplo da eficácia do método HVSR na determinação da frequência fundamental do solo em cada local independentemente das reservas sobre a sua fundamentação teórica quanto à composição do ruído ambiente.

Em Portugal existem também estudos de efeitos de sítio com base na metodologia

HVSR. São exemplo, a caracterização geotécnica e de resposta sísmica das formações geológicas na cidade de Lisboa (Teves-Costa *et al.*, 2014) e o estudo de efeitos de sítio e distribuição de danos na cidade de Angra do Heroísmo, na Ilha dos Açores (Teves-Costa *et al.*, 2007).

Para a cidade do Porto não foram localizados estudos baseados na metodologia HVSR mas foi possível encontrar estudos de análise da resposta local relativamente à acção sísmica. Para a execução da Carta Geotécnica do Porto, escala 1:10 000 (CMP, 2003) foram realizados estudos de sismicidade com base nos seguintes factores:

- Potencial para a ruptura sísmica à superfície das falhas existentes na região;
- Níveis esperados do movimento sísmico do solo, pela análise da sismicidade histórica;
- Potencial para a ocorrência de efeitos de liquefacção e deslizamento de terrenos.

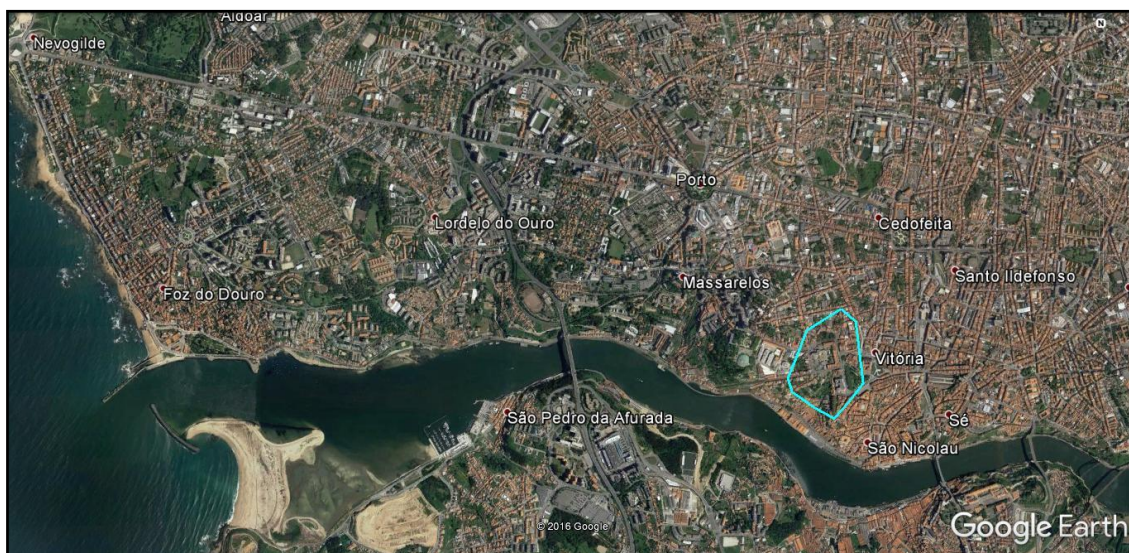
Um estudo mais pormenorizado, levado a cabo na região realizou-se no âmbito do subprojecto GEORISK (Sousa *et al.*, 2008), que tinha como objectivo a criação de uma base de dados de suporte à formulação de medidas de gestão, prevenção e protecção, no que diz respeito aos danos causados por sismos, deslizamento de terrenos e queda de blocos, para a área do Centro Histórico da cidade do Porto. A execução deste projecto envolveu a construção de cartografia de perigosidade geológica onde se cartografaram valores de deformabilidade do substrato rochoso, com base em valores de velocidade de propagação das ondas S, e também, valores de incremento de intensidade sísmica onde se consideraram factores de efeitos de sítio para os diferentes tipos de solo (Sousa *et al.*, 2008).



## Capítulo 2 – Caracterização geral da área de estudo

### 2.1. Enquadramento geográfico

A área de estudo analisada no decorrer deste projecto localiza-se na zona Norte de Portugal Continental (NUTS I e II), nomeadamente na cidade do Porto. Esta cidade, com cerca de 45 km<sup>2</sup> e 240 mil habitantes (Censos, 2011), é a capital do distrito do Porto e capital da Área Metropolitana do Porto (NUTS III) e encontra-se delimitada a Norte (N) pelos concelhos de Matosinhos, Maia e Gondomar, a Sul (S) pelo Rio Douro (fazendo a fronteira com o concelho de Vila Nova de Gaia), a Este (E) pelo conselho de Gondomar e Oeste (W) pelo Oceano Atlântico.

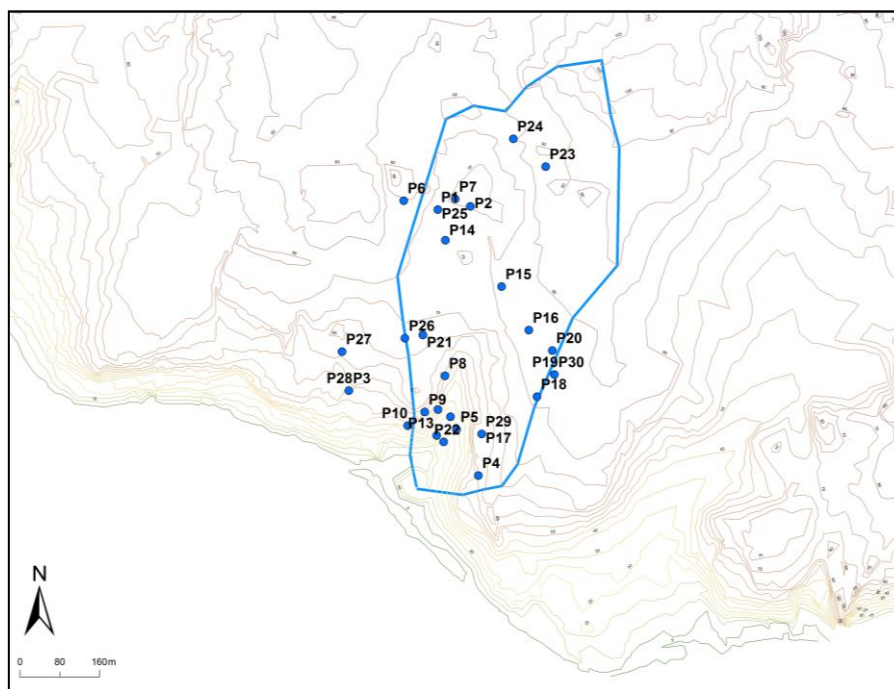


*Figura 6 – Imagem aérea da cidade do Porto com delimitação (a azul) da área amostrada (imagem retirada do Google Earth).*

Mais especificamente a área amostrada encontra-se enquadrada na União de Freguesias da Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória e compreende os seguintes locais de referência na cidade: Jardim do Carregal, envolvente do Hospital de Santo António, Rua da Restauração, Jardim e Passeio das Virtudes, Jardim da Cordoaria, entre outros.

Por uma questão de orientação e delimitação da área a estudar, procedeu-se à delimitação da bacia hidrográfica do rio Frio (figura 7). Segundo consta na Carta Geotécnica do Porto na escala 1/10000 (Câmara Municipal do Porto, 2003) o rio Frio, também designado por ribeira das Virtudes ou ribeira do Carregal, é um pequeno afluente

do rio Douro que nasce na zona da rua da Torrinha e seguindo pelas zonas do Carregal, passando por baixo do Hospital de Santo António e atravessando o jardim das Virtudes, acabava por desaguar no local onde se encontra o edifício da Alfândega. Por volta do ano 1769 foi coberto para se proceder à construção da cerca do Hospital de Santo António (Costa, 1938 em Câmara Municipal do Porto, 2003) e por isso actualmente o seu caudal é subterrâneo e a sua desembocadura foi desviada devido à construção do edifício da Alfândega.



*Figura 7 – Representação do limite da bacia hidrográfica do Rio Frio conjuntamente com a posição de cada ponto amostrado.*

Orograficamente, a cidade do Porto, é descrita como local de relevo pouco acentuado, estendendo-se ao longo de uma plataforma litoral aplanada com inclinação suave para W (orla marítima) e S (encaixe do rio Douro) (Câmara Municipal do Porto, 2003). Restringindo estas observações à área analisada verificou-se que a cota mais elevada dos pontos amostrados, no nível superficial, se encontra ao nível dos 87,5 m e a cota mais baixa ao nível dos 22,5 m. A topografia natural da área encontra-se intensamente modelada pelas alterações antrópicas, no entanto, constata-se uma zona de diminuição de cotas mais acentuada que corresponde à zona do Passeio das Virtudes e ao próprio Jardim das Virtudes, onde se observam patamares escalonados ao longo das vertentes do vale com forte declive.



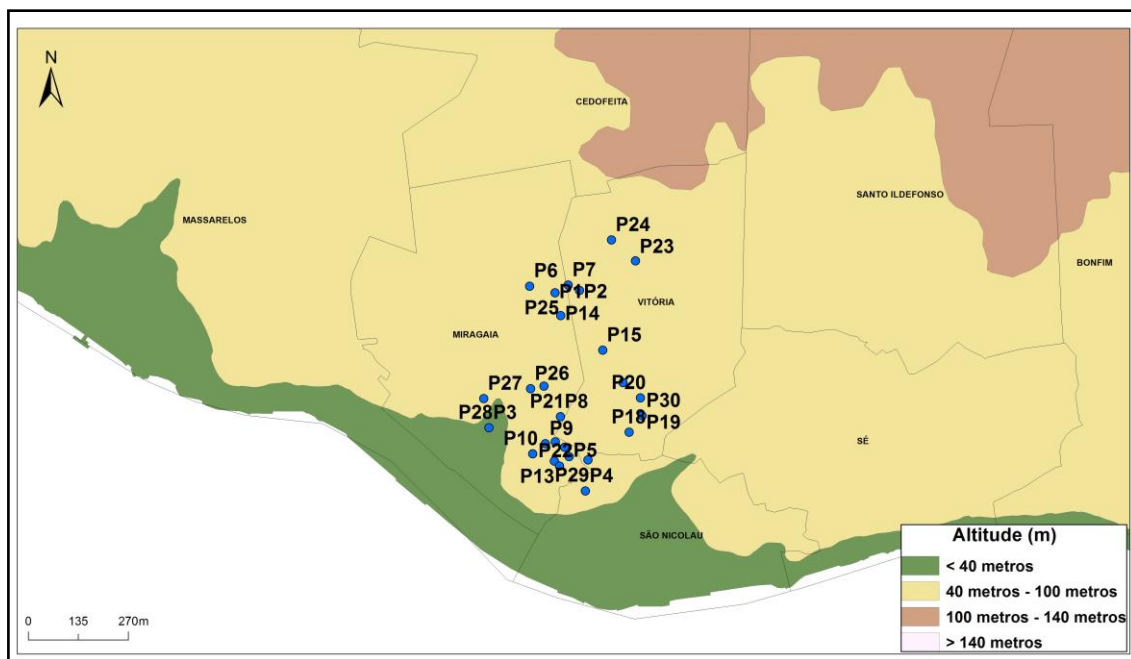


Figura 8 – Representação do declive da área de estudo com representação dos pontos amostrados.

## 2.2. Enquadramento geológico

No contexto geotectónico o território português enquadra-se no conjunto de terrenos que formam o Maciço Hespérico e que, se encontra subdividido em diferentes unidades geoestruturais (figura 9). A consolidação destes terrenos deu-se durante a orogenia hercínica. Especificamente, do ponto de vista tectono-estratigráfico, a cidade do Porto, encontra-se no limite entre a Zona Centro-Ibérica (ZCI), onde se insere efectivamente, e a Zona de Ossa Morena (ZOM). O limite entre as duas unidades é marcado pela zona de cisalhamento Porto-Tomar (ZCPT) que atravessa a cidade na parte mais ocidental, nas zonas da Foz do Douro e Nevogilde (Câmara Municipal do Porto, 2003).



Figura 9 – Modelo tectono-estratigráfico de Portugal Continental (Ribeiro et al., 1980).

É possível distinguir na cidade do Porto três tipos de formações distintas: formações sedimentares de cobertura, formações metamórficas e formações ígneas (Câmara Municipal do Porto, 2003). As formações ígneas são de grande expressão na cidade, especialmente as rochas graníticas de idade hercínica ou varisca (340 a 270 Ma) (Câmara Municipal do Porto, 2003). Segundo a classificação dos granitos da Zona Centro-Ibérica de Ferreira *et al.*, (1988) (Ferreira *et al.*, 1988 em Noronha, 2006) podem distinguir-se dois grupos de rochas graníticas:

- Granitos peraluminosos ou “granitos de duas micas” (moscovite dominante);
- Granitos monzoníticos e granodioritos ou “granitóides biotíticos com plagioclase cálcica”.

Estes granitos são orogénico e portanto, no caso dos granitos biotíticos estes dividem-se em duas séries em que uma é ante a sintectónica e a outra tarde a pós-tectónica, já no caso dos granitos de duas micas estes são sintectónicos relativamente à terceira fase de deformação da orogenia hercínica (Câmara Municipal do Porto, 2003).

No conjunto de rochas eruptivas que se observam um pouco por toda a cidade, e que em alguns locais se encontram ao nível de afloramento, a área amostrada encontra-se assente na unidade geológica – granito alcalino, de grão médio a grosseiro, leucocrata de duas micas (normalmente designado como “granito do Porto”) que corresponde ao primeiro grupo de granitos citado anteriormente (Costa & Teixeira, 1957). Em termos de idade, na Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000 (Costa & Teixeira, 1957) são classificados como pós-complexo xisto-grauváquico, ante-vestefaliano e provavelmente ante-silúrico, no entanto, estudos posteriores sobre a geocronologia destes granitos apontam uma idade absoluta a rondar os 310 a 315 M o que corresponde a uma idade intra-vestefaliana (Pinto *et al.*, 1987 em Câmara Municipal do Porto, 2003).

No geral, encontram-se orientados com alinhamento NW-SE devido às estruturas hercínicas e está delimitado a NE pelo Complexo Xisto-Grauváquico e a SW pelo Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Câmara Municipal do Porto, 2003). Em muitos locais, estes granitos encontram-se intensamente meteorizados e alterados (Costa & Teixeira, 1957) factor que se revela muito importante para este trabalho, como se verá mais à frente.

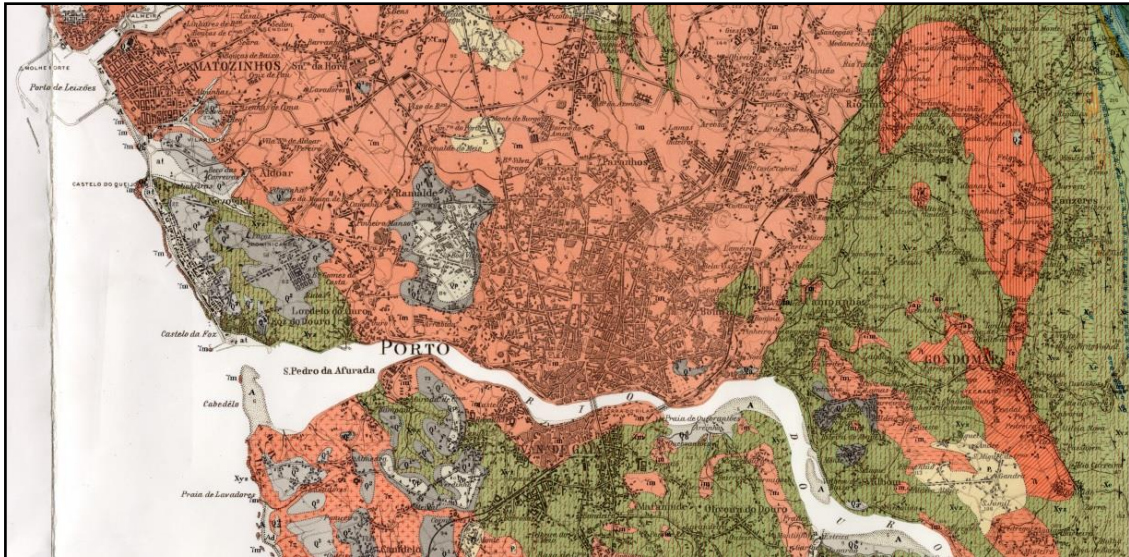


Figura 10 – Excerto da Carta Geológica de Portugal, folha 9-C (Porto) na escala 1:50 000 (Costa et al., 1957).

### 2.3. Enquadramento sismotectónico

Num contexto de tectónica de placas regional, o território Português localiza-se próximo de uma zona de junção de três placas tectónicas: a placa euroasiática, a placa americana e a placa africana. Efectivamente, o território de Portugal Continental localiza-se no bordo ocidental da placa euroasiática, numa margem continental de orientação N-S. Sendo que, a oeste, esta placa contacta com a placa americana, e estando esta divisão marcada pela dorsal médio atlântica; a sul, contacta com a placa africana, sendo esta separação conhecida como a falha Açores-Gibraltar e estando o território continental em posição de grande proximidade com este limite.

O limite ocidental onde a placa euroasiática contacta com a placa americana é um limite divergente onde se verifica a expansão das referidas placas através da ascensão de material magmático a partir do rift médio atlântico (Lima, 1998).

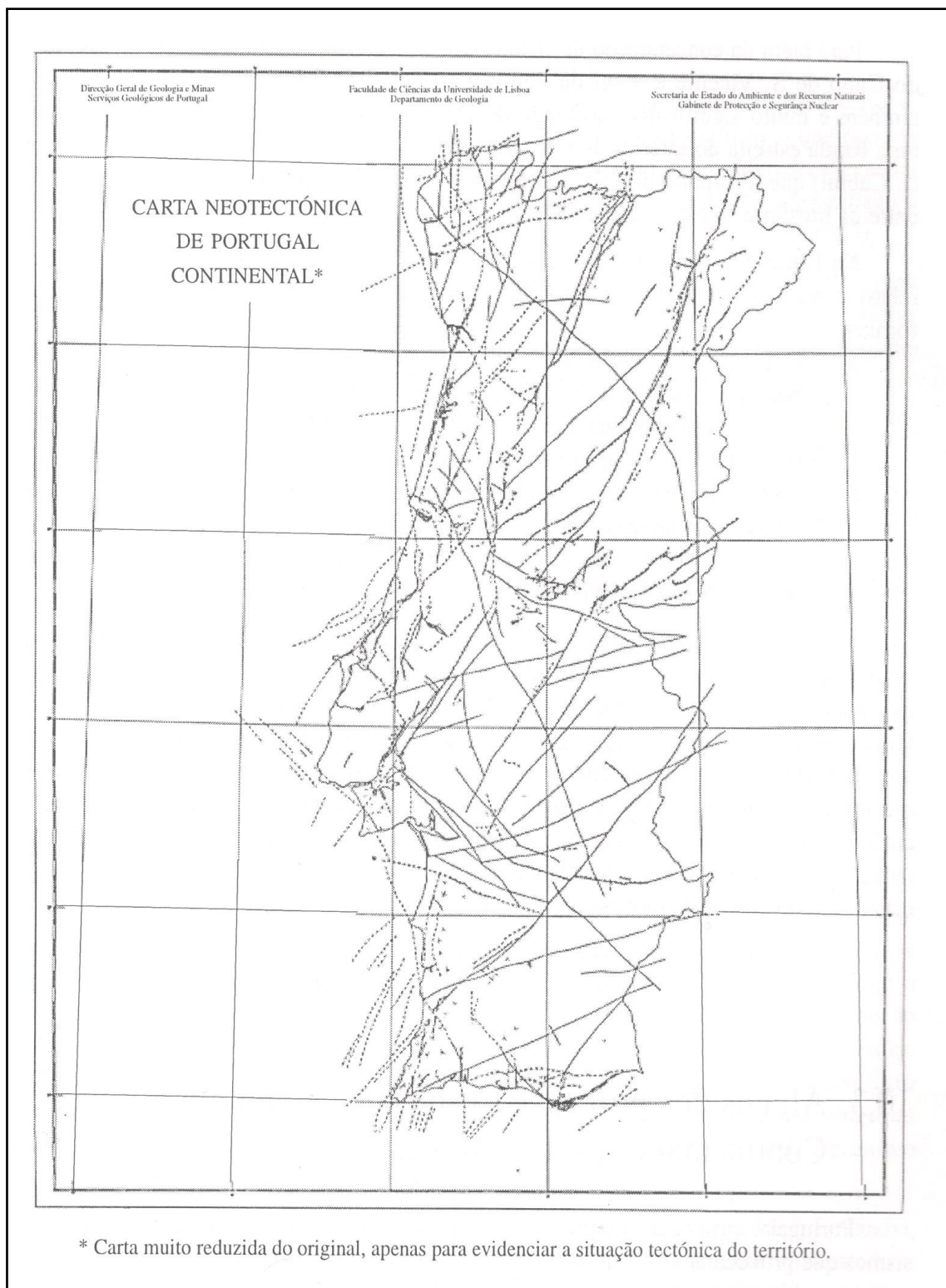
O limite entre as placas euroasiática e africana é de carácter mais complexo. Analisando o troço deste limite entre as longitudes 24°W a 5°W, designado como falha Açores-Gibraltar, é possível dividi-lo em dois segmentos com diferentes movimentações (Borges et al., 2001). A divisão entre estes segmentos encontra-se demarcada pela existência de uma estrutura submarina, o chamado banco de Gorringe, que atinge os 25m no seu ponto mais alto e que é considerado uma das principais fontes de sismicidade na Península Ibérica (Moreira, 1985 & Buforn et al., 1988 em Borges et al., 2001). O

primeiro segmento deste limite é conhecido como a falha da Glória, localiza-se a oeste do banco de Gorringe, entre as longitudes 24°W e 13°W (Borges *et al.*, 2001), e o seu movimento caracteriza-se por um deslizamento horizontal (Bufo *et al.*, 1998 em Borges *et al.*, 2001). O segundo segmento, entre as longitudes 13°W e 5°W e onde de facto se localiza o banco de Gorringe, trata-se de uma zona de convergência entre placas com uma movimentação lenta de cerca de 4 mm/ano (Argus *et al.*, 1989 em Borges *et al.*, 2001) onde a placa africana mergulha sob a placa euroasiática (Lima, 1998).



Figura 11 – Esquema do contexto tectónico de Portugal (LNEC, 2016).

Sendo assim, grande parte da sismicidade observada na Península Ibérica encontra-se associada a este contexto de movimentações entre placas tectónicas. E tendo em conta as alterações sofridas pelo território durante o período quaternário, condicionadas pela orogenia alpina, e que vieram reactivar alguns elementos estruturais relativos à orogenia hercínica, que acabaram por resultar num território extensamente retalhado (Lima, 1998), é importante, na análise da sismicidade do nosso país, observar com atenção os acidentes tectónicos que a Carta Neotectónica de Portugal (Cabral & Ribeiro, 1989) identifica como de maior relevância.



*Figura 12 – Carta Neotectónica de Portugal Continental elaborada por Cabral & Ribeiro, 1989 (Lima, 1998).*



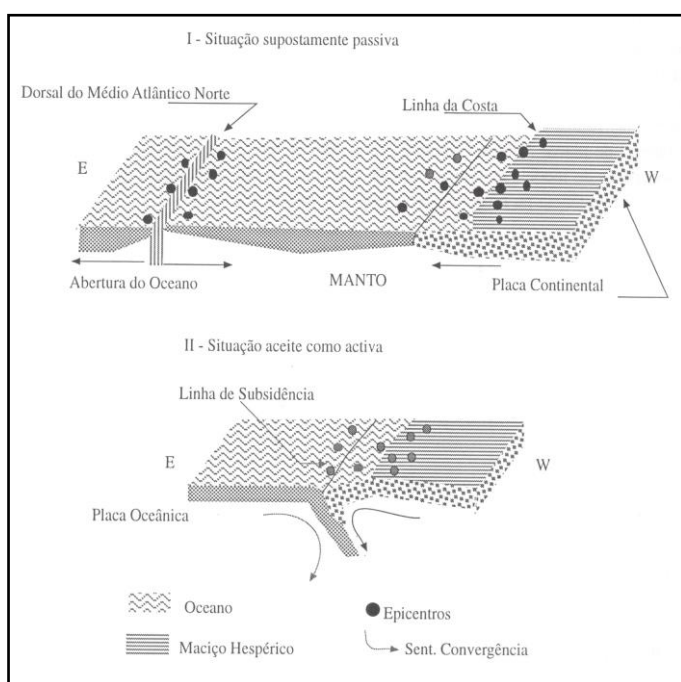
Posto isto, a Carta Neotectónica (Cabral & Ribeiro, 1989) identifica três tipos diferentes de falhas activas no nosso território:

- Falhas do tipo inverso, que se encontram dispostas segundo a orientação NE-SW a ENE-WSW e que junto ao litoral ocidental se encontram segundo a orientação NNE-SSW a N-S;
- Falhas de desligamento, dispostas segundo a orientação NNE-SSW;
- Falhas do tipo normal, aparentemente mais raras que as anteriores, e dispostas segundo a orientação NW-SE a WNW-ESSE.

Relativamente a taxas de deslocamento destas falhas, nos últimos 2 Ma, são apontados valores de velocidade médios entre 0.01 mm/ano e 0.5 mm/ano, que correspondem a graus de actividade baixos a moderados (Cabral, 1986 em Cabral & Ribeiro, 1989).

Segundo estudos dos dois autores que vêm a ser referidos neste texto, J. Cabral e A. Ribeiro e que propuseram em 1986 um Modelo Geodinâmico para o território de Portugal Continental, o contexto da tectónica que afecta o nosso território irá continuar a evoluir para uma situação ainda mais complexa onde se verificará uma alteração da margem continental oeste ibérica, de passiva para activa (Cabral & Ribeiro, 1989).

Admite-se que, ao longo da margem oeste da Península Ibérica, se está a formar uma zona de subducção provocada pelo movimento de convergência entre a placa oceânica (que se encontra em expansão a partir da dorsal médio atlântica) e a placa continental (na sua parte mais adelgada) (Lima, 1998).



*Figura 13 – Modelo geodinâmico de margem continental activa de Cabral & Ribeiro, 1989 (Lima, 1998).*

Este modelo geodinâmico pressupõe a acumulação de maiores tensões ao longo da margem continental o que se traduz numa taxa mais elevada de eventos sísmicos no bordo litoral de Portugal Continental, e que, consequentemente, terá tendência a aumentar e eventualmente levar à ruptura de falhas activas neoformadas ao longo da plataforma continental (Cabral & Ribeiro, 1989).

Numa perspectiva local relativamente à cidade do Porto, a área da cidade foi condicionada especificamente pelas fases F1 e F3 de deformação da orogenia hercínica, tendo dado origem a um conjunto principal de alinhamentos segundo as orientações ENE-WSW a NW-SE e mais tarde NNE-SSW a N-S (Câmara Municipal do Porto, 2003).

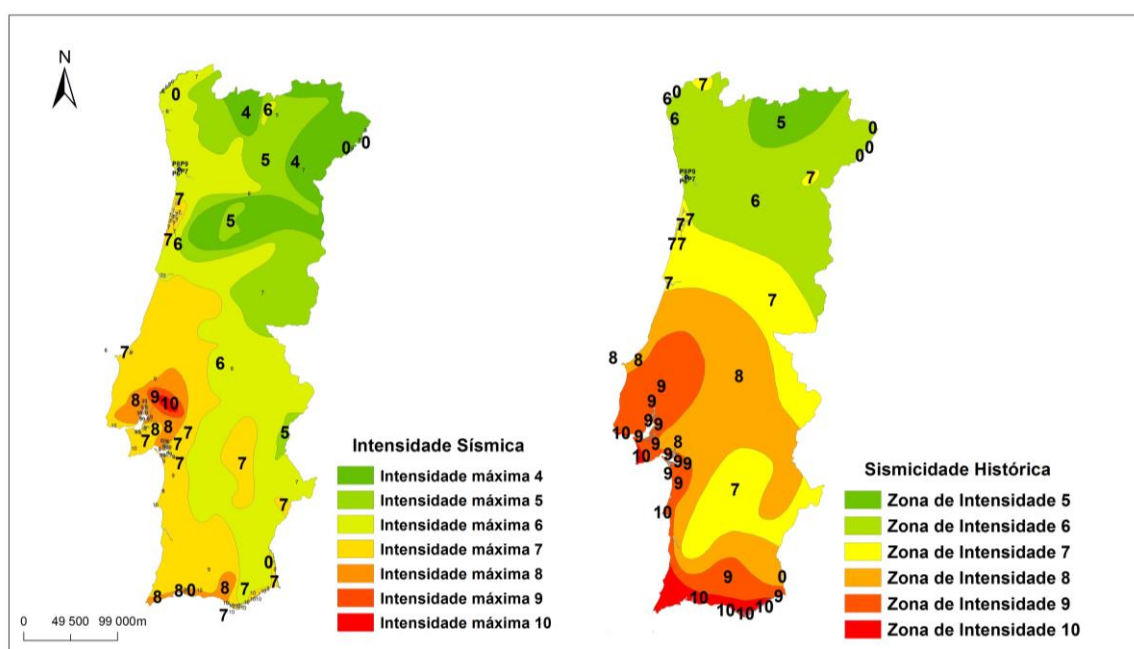


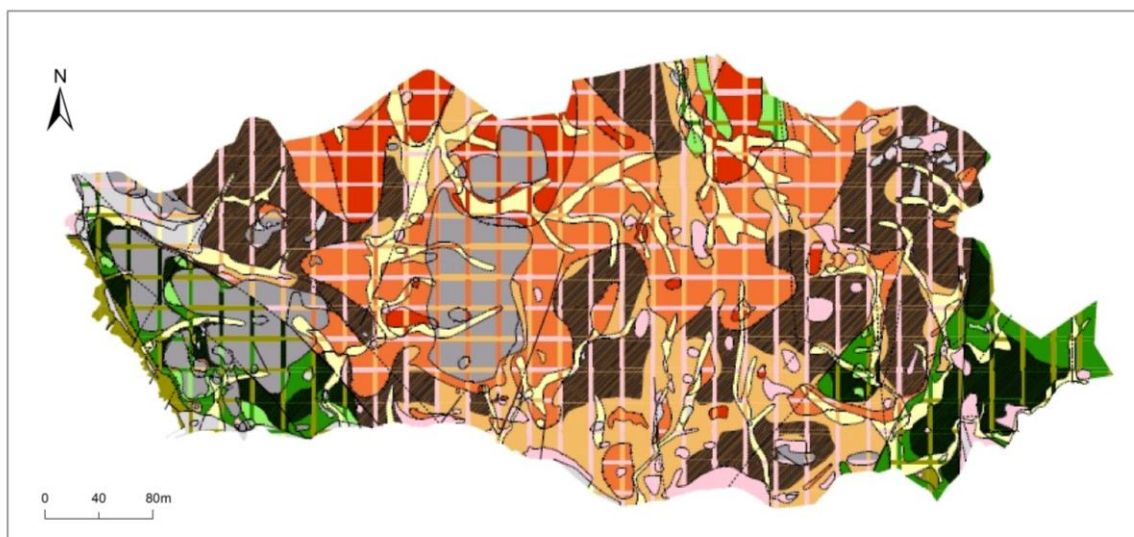
Figura 14 – Mapas de Intensidade Sísmica e Sismicidade Histórica para Portugal Continental (Atlas do Ambiente, 2016).

## 2.4. Enquadramento geotécnico

No âmbito deste trabalho, e tendo em conta que se enquadra numa escala de observação local, para uma melhor compreensão das estruturas geológicas e da litologia presentes na área de estudo, recorreu-se à Carta Geotécnica do Porto, na escala 1:10 000 (Câmara Municipal do Porto, 2003) uma vez que as unidades nela representada foram alvo de uma análise mais detalhada e pormenorizada do que a que se encontra na Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000 (Costa & Teixeira, 1957).

Posto isto, com base nas especificações da Associação Internacional de Geologia, de Engenharia e do Ambiente, AIGE (1981), os critérios utilizados para a identificação das unidades geotécnicas presentes na Carta Geotécnica do Porto (Câmara Municipal do Porto, 2003), foram os seguintes:

- Identificação do tipo litológico (com base nas propriedades petrográficas);
- Descrição das propriedades das rochas e solos (com base na cor, textura, dimensão das partículas, grau de alteração, compactidade ou consistência e resistência);
- Descrição das propriedades dos maciços, necessárias à descrição do seu comportamento (com base na estrutura, descontinuidades e perfil de alteração).



*Figura 15 – Carta Geotécnica do Porto, na escala 1: 10 000 (Câmara Municipal do Porto, 2003).*

Desta análise resultou um conjunto total de 10 unidades geotécnicas para a cidade do Porto como se pode ver na figura 16. É possível dividir esta classificação em três grupos de acordo com a tipologia das unidades litológicas que lhes deram origem, podem então divisar-se as unidades pertencentes aos depósitos recentes, às formações metamórficas e finalmente as resultantes das formações ígneas. Quer no caso das formações metamórficas, quer no das formações ígneas, percebe-se que a sua ordem de apresentação está de acordo com o grau de resistência/compactação das unidades.



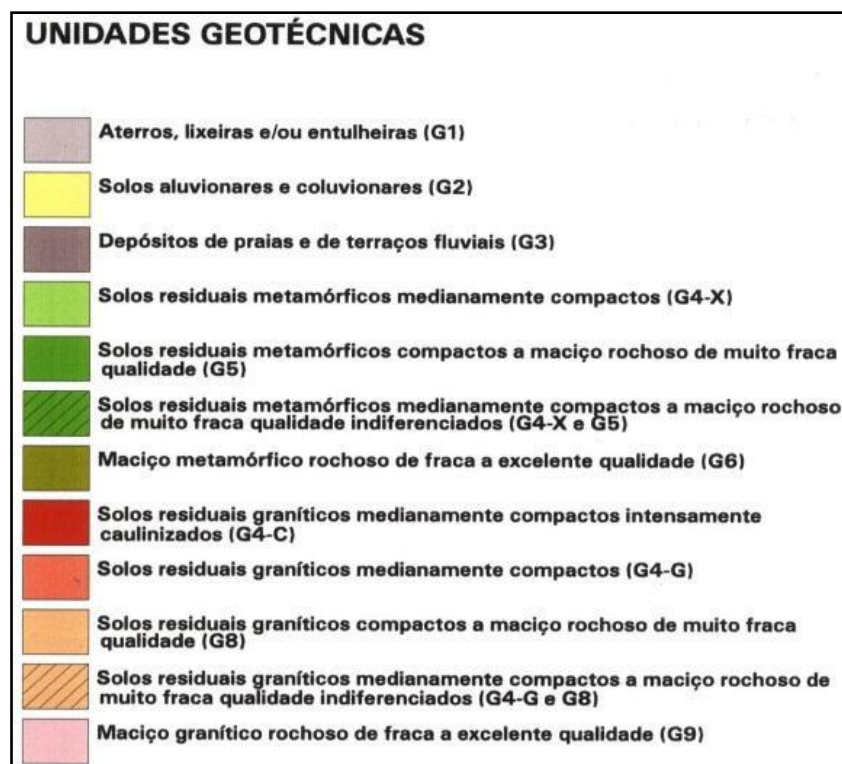


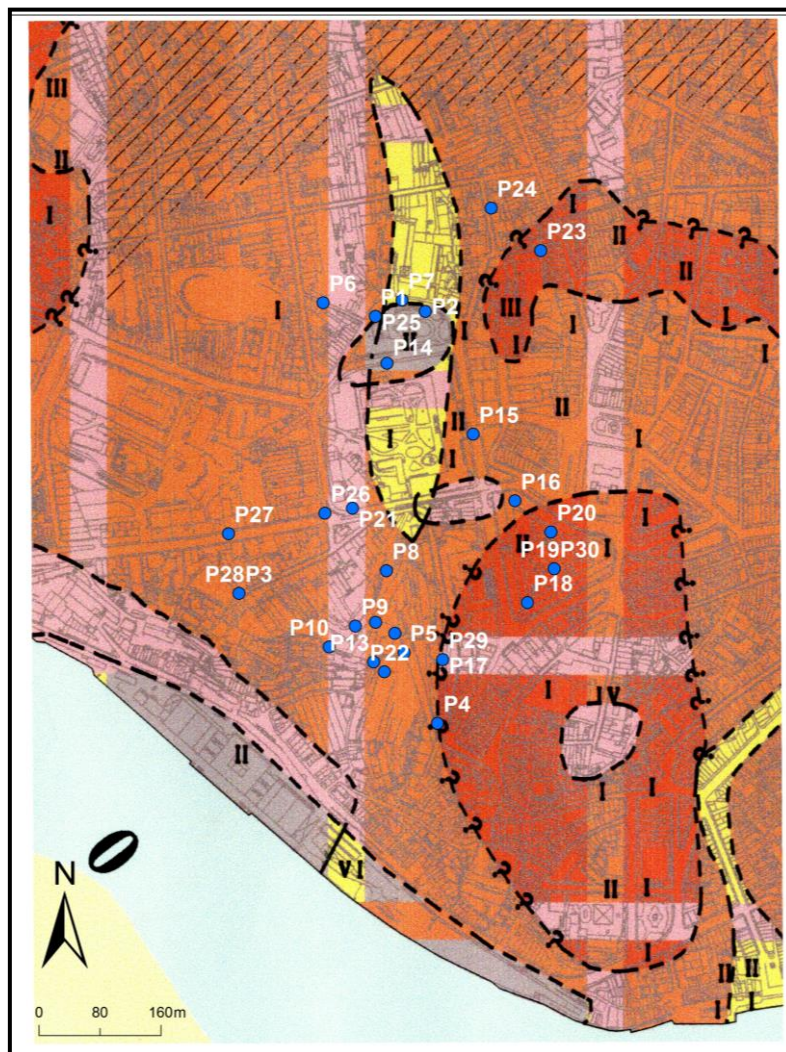
Figura 16 – Legenda da Carta Geotécnica do Porto (Câmara Municipal do Porto, 2003).

Do conjunto de unidades geotécnicas identificadas na carta da cidade, na área de estudo podem encontrar-se as seguintes:

- G1 – aterros: muito numerosos e heterogéneos de natureza variada (associados à construção de vias de comunicação e edificado), encontram-se geralmente desde a superfície e até os 3m de profundidade;
- G2 – solos aluvionares e coluvionares: ocorrem associados a linhas de água ou na base de encostas, por vezes cultivados e sustidos por muros de suporte, encontram-se desde a superfície ou a partir dos 2m de profundidade e na maioria dos casos não ultrapassam os 6 m de profundidade, embora já tenham sido registadas profundidades de 48m para esta unidade;
- G4-G – solos residuais graníticos medianamente compactos: são de espessura muito variável, encontram-se desde a superfície ou 1m de profundidade até cerca de 9m, dentre todos os registos, a profundidade máxima observada foi de 31m;~
- G8 – solos residuais graníticos compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade: o topo desta camada encontra-se geralmente entre os 0m e 11m de profundidade e a sua base entre os 6m e os 15m;

- G9 – maciço rochoso granítico de fraca a excelente qualidade: esta unidade representa maciço rochoso sendo que o de melhor qualidade se encontra, normalmente, a maiores profundidades, encontra-se desde a superfície até dezenas de metros de profundidade (Câmara Municipal do Porto, 2003).

É de notar que entre as unidades G4-G e G9 o que se verifica são os efeitos da meteorização dos granitos que cobrem toda a extensão da cidade, por este motivo dividem-se as unidades desde solos residuais a maciço rochoso com diferentes graus de compactação. Esta diferenciação é muito importante para a interpretação dos resultados obtidos, uma vez que o grau de resistência do solo ou maciço influencia o resultado obtido a nível de frequência fundamental do ponto amostrado.



*Figura 17 – Excerto da Carta Geotécnica do Porto (Câmara Municipal do Porto, 2003) com foco na área amostrada, incluindo a localização de cada ponto recolhido.*

## Capítulo 3 – Metodologia e instrumentação

### 3.1. Método HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio)

A sigla HVSR significa “*Horizontal-to-vertical spectral ratio*”, ou seja, em português, razão espectral horizontal-para-vertical, e representa assim um método de análise do ruído natural do solo, ou como é normalmente designado, ruído ambiente.

O método HVSR foi inicialmente proposto por Nogoshi e Igarashi em 1971 mas foi posteriormente alterado e desenvolvido por Yutaka Nakamura em 1989 tendo adquirido como nome alternativo o do próprio investigador, “*Método de Nakamura*” (SESAME, 2005)

Tendo como objectivo a estimativa do rácio entre o espectro de amplitude de Fourier das componentes horizontal (H) e vertical (V) do movimento das ondas que compõe o campo de ruído natural do solo, este método implica em linhas gerais a aplicação dos seguintes passos (SARA electronic instruments, 2013):

- Gravação do ruído ambiente (todas as três componentes: horizontal – norte-sul e este-oeste; e vertical) utilizando o equipamento apropriado;
- Selecção das janelas de tempo mais estacionárias (utilizando um algoritmo “*anti-triggering*”) de modo a evitar ruído transiente;
- Aplicação da transformada de Fourier a cada uma das componentes do sinal;
- Cálculo da média entre as duas componentes horizontais;
- Cálculo da média entre o resultado das duas componentes horizontais e a componente vertical.

### 3.2. Aquisição de dados

Para a realização deste estudo foram efectuadas 7 campanhas de recolha de dados ao longo de 10 meses (Outubro a Julho) o que resultou num conjunto de 30 pontos analisados (tabela 2). A recolha dos dados foi deliberadamente estendida ao longo destes meses para poder abarcar diferentes condições meteorológicas e também diferentes períodos horários (devido às rotinas antropogénicas) para que se verificasse a influência destes factores no resultado das gravações e para se determinar as melhores condições de gravação.

As medições foram efectuadas com dois equipamentos diferentes, o Broadband Seismometer CMG-6TD do fabricante Guralp Systems, com o qual se registou desde o ponto 1 ao ponto 22, e o SR04S3 Geobox do fabricante Sara Electronics, com o qual se registaram os restantes pontos (ponto 23 ao ponto 30). O surgimento de problemas de foro técnico com o primeiro equipamento motivou a substituição de equipamento já próximo da fase final do projecto.

*Tabela 2 – Total de pontos analisados no decorrer do projecto com referência espacial ao local de recolha de dados (Local) bem como as coordenadas do ponto (x, y).*

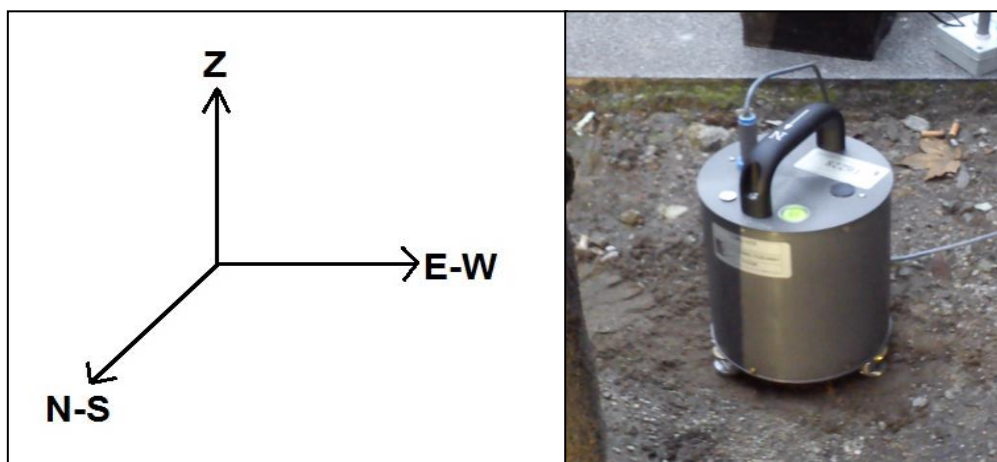
<b>Ponto</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Local</b>	<b>Sismómetro</b>
1	159173,47	464479,65	Jardim do Carregal	CMG-6TD
2	159239,27	464486,07	Jardim do Carregal	CMG-6TD
3	158994,66	464115,07	Rua das Bandeirinhas	CMG-6TD
4	159255,12	463943,94	Passeio das Virtudes	CMG-6TD
5	159211,1	464037,04	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
6	159105,01	464497,62	Rua Prof. Jaime Rios de Sousa	CMG-6TD
7	159208,57	464500,74	Rua Clemente Meneses	CMG-6TD
8	159187,92	464144,84	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
9	159147,17	464071,95	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
10	159112,96	464044,38	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
11	159173,78	464077,05	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
12	159199,12	464062,41	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
13	159171,39	464024,62	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
14	159188,75	464417,86	Hospital de Santo António	CMG-6TD
15	159302,03	464324,68	Hospital de Santo António	CMG-6TD
16	159356,8	464236,76	Jardim da Cordoaria	CMG-6TD
17	159262,12	464027,81	Jardim do Passeio das Virtudes	CMG-6TD
18	159373,08	464102,78	Jardim da Cordoaria	CMG-6TD

19	159408,31	464147,31	Jardim da Cordoaria	CMG-6TD
20	159403,92	464195,77	Jardim da Cordoaria	CMG-6TD
21	159143,6	464227,15	Hospital de Santo António	CMG-6TD
22	159185,31	464011,58	Jardim das Virtudes	CMG-6TD
23	159390,59	464566,05	Travessa do Carregal	GEOBOX
24	159325,61	464622,25	Rua Diogo Brandão	GEOBOX
25	159173,47	464479,65	Ponto 1	GEOBOX
26	159107,42	464220,57	Rua Dr. Alberto Aires de Gouveia	GEOBOX
27	158980,64	464193,51	Rua da Restauração	GEOBOX
28	158994,66	464115,07	Ponto 3	GEOBOX
29	159262,12	464027,81	Ponto 17	GEOBOX
30	159408,31	464147,31	Ponto 19	GEOBOX

### 3.2.1. CMG-6TD - Guralp Systems

O primeiro, e principal, equipamento utilizado tratou-se de um sismómetro de banda larga do fabricante Guralp Systems, modelo CMG-6TD.

Trata-se de um sismómetro de três componentes portátil: mede nos três eixos do movimento (norte-sul, este-oeste e vertical).



*Figura 18 – Esquema exemplificativo dos três eixos de direcção do movimento e imagem do sismógrafo de banda larga CMG-6TD.*

O sismómetro vem acompanhado de um software de aquisição para se proceder à conversão do sinal analógico em sinal digital para na posterioridade ser possível o tratamento do mesmo em computador. O software Scream! (Seismometer Configuration, Real Time Acquisition and Monitoring) permite efectuar a configuração apropriada do sismómetro e para além da recolha de dados sísmicos permite a monitorização em tempo real do sinal a ser recolhido.

Apesar de originalmente concebido para ser instalado num só local durante um longo período de tempo, o CMG-6TD, provou ser de fácil adaptação para a tarefa de gravação do ruído ambiente sendo facilmente transportado de local para local e necessitando apenas de alguns minutos para atingir a estabilização dos seus eixos (após transporte) para se proceder a nova gravação.

Desta forma, basta transportar o sismómetro até ao local desejado, nivelar o mesmo, conectá-lo à bateria portátil exterior, conectar ao GPS (caso se verifique a sua necessidade, neste estudo não foi utilizado GPS) e conectar ao computador portátil onde foi previamente instalado o software (Scream!) e começar a gravar assim que a conexão se tiver estabilizado em 32 bits.

### **3.2.2. SR04S3 GEOBOX – Sara Electronic Instruments**

O sismómetro SR04S3 GEOBOX do fabricante Sara Electronic Instruments foi o segundo equipamento utilizado nas campanhas de gravação de ruído ambiente. Trata-se de um instrumento de alta performance desenvolvido especificamente para a gravação de ruído ambiente (embora possa ser utilizado para outros fins). Tendo sido desenvolvido especificamente para este fim é compreensivelmente mais compacto e leve, com uma bateria incorporada, o que em comparação com o CMG-6TD, o torna muito mais prático. Note-se que este sensor (GEOBOX) é significativamente mais recente do que o referido anteriormente.





*Figura 19 – Sismómetro SR04S3 GEOBOX.*

Em termos de aquisição de dados é também mais rápido em questões de estabilização após deslocamentos entre locais de gravação e o software de aquisição que o acompanha, o SEISMOWIN, oferece, aquando da gravação, não só a monitorização em tempo real do sinal como a visualização do movimento da partícula horizontal e o gráfico HVSR para cada janela de tempo standard (50 em 50 segundos).

### **3.3.3. Parâmetros de Aquisição**

No que diz respeito às condições de recolha dos dados e parâmetros utilizados recorreu-se ao manual do projecto *Site Effects Assessment Using Ambient Excitations* ou como é normalmente designado SESAME (SESAME, 2005) como base para a obtenção de gravações de “boa qualidade” (tabela 3). E, da mesma forma, também foi utilizada a ficha de campo presente no manual citado para registo de informações relevantes relativamente a cada ponto recolhido (Anexo 1).

Tabela 3 – Parâmetros de aquisição para gravações de ruído ambiente de boa qualidade para a construção de gráficos H/V (traduzido de: SESAME, 2005).

Tipo de parâmetro		Principais recomendações
Duração de gravação	Mínimo $f_0$ [Hz] esperado	Mínimo recomendado de gravação [min]
	0.2	30'
	0.5	20'
	1	10'
	2	5'
	5	3'
Espaçamento	10	2'
	<p><u>Microzonamento</u>: começar com um espaçamento alargado (por exemplo uma grelha de 500 m) e caso seja necessário diminuir até um espaçamento de 250 m.</p> <p><u>Único sítio amostrado</u>: nunca utilizar um único ponto de gravação para derivar o valor de <math>f_0</math>.</p>	
Parâmetros de gravação	Nivelar o sensor conforme recomendação do produtor.	
In situ sensor-solo acoplamento	Colocar o sensor directamente no solo sempre que possível. Evitar colocar o sensor em locais “moles” (lama, erva alta, etc.), ou solos saturados depois de chover.	
Acoplamento artificial	Evitar bases de materiais “moles” como cartão, esferovite, etc..	
Estruturas próximas	<p>Evitar gravar perto de estruturas como edifícios, árvores, etc., em caso de ventos fortes (mais de 5 m/s) pode afectar os resultados.</p> <p>Evitar medir sobre estruturas como parques de estacionamento, tubos, saneamento, etc.</p>	
Condições meteorológicas	<p><u>Vento</u>: proteger o sensor do vento.</p> <p><u>Chuva</u>: evitar fazer medições debaixo de chuva.</p> <p><u>Temperatura</u>: verificar recomendações do produtor.</p> <p><u>Perturbações meteorológicas</u>: indicar na folha de registo se as gravações foram feitas durante um evento meteorológico de baixa-pressão.</p>	
Perturbações	<p><u>Fontes monocromáticas</u>: evitar medições perto de máquinas de construção ou maquinaria industrial, etc.</p> <p><u>Transientes</u>: em caso de transientes (passos, carros, etc.) aumentar o tempo de gravação para permitir uma remoção posterior destas perturbações.</p>	



### 3.3. Processamento de dados

Para o processamento dos dados recolhidos ao longo do estudo foram utilizados duas extensões do software desenvolvido pela Geopsy.org, nomeadamente o software de processamento do sinal Geopsy e o software de inversão Dinver.

Trata-se de um “*open source software*” (programa de código aberto – divulgação e distribuição gratuita) desenvolvido pela equipa Geopsy.org durante o decorrer do projecto europeu SESAME em meados de 2005. Este software permite o tratamento de dados relativos a estudos de ruído ambiente como: gráficos HVSR e MASW (*multi-channel analysis of surface waves*).

#### 3.3.1. Geopsy

A partir do ficheiro de registo do ruído ambiente, procedeu-se à selecção das janelas de tempo estacionárias, excluindo da análise aquelas onde se verificavam picos de amplitude provocados por ruídos transientes no momento da gravação. Posteriormente aplicou-se a cada registo, o algoritmo de suavização, conhecido como algoritmo Konno-Ohmachi, e limitou-se o intervalo de frequências para uma banda entre 0.5 Hz e 20 Hz.

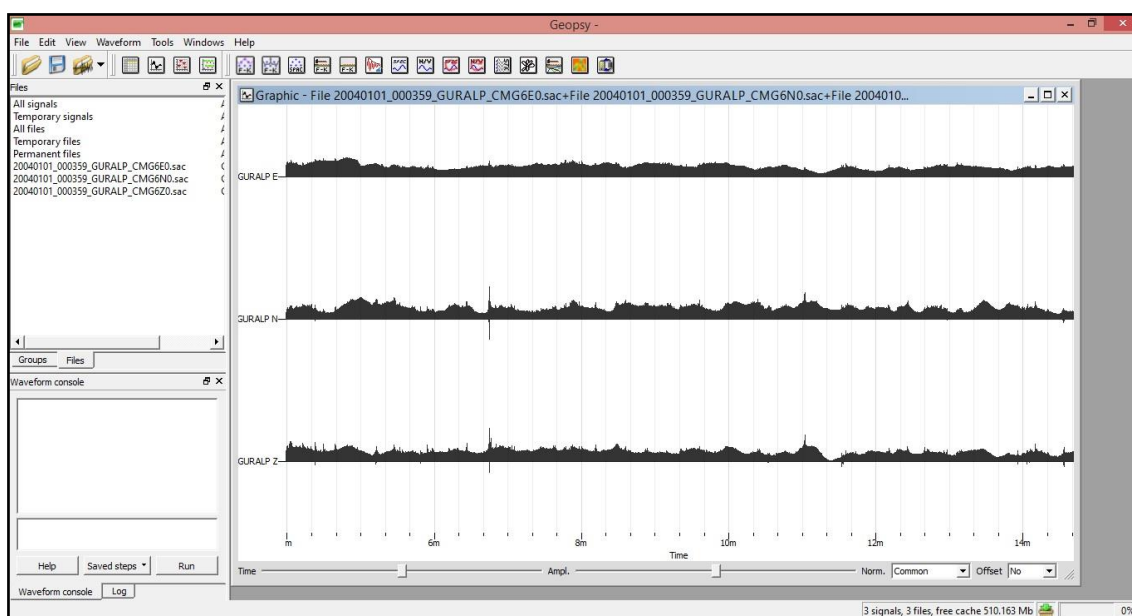


Figura 20 – Registo da gravação de ruído ambiente, no software Geopsy.

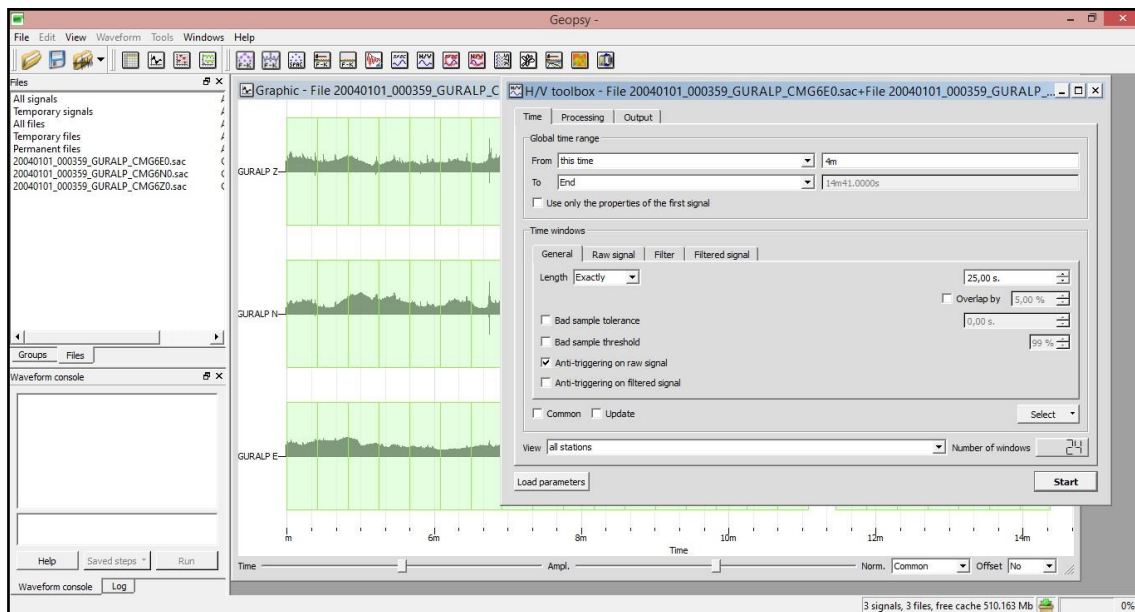


Figura 21 – Menu de configuração para a obtenção do gráfico HVSR, software Geopsy.

Tendo-se construído o gráfico HVSR para cada registo é possível extrair os seguintes valores:

- Valor de frequência fundamental ( $f_0$ ) em hertz;
- Valor da amplitude do pico de frequência fundamental ( $A_0$ );
- Valores de desvio padrão;

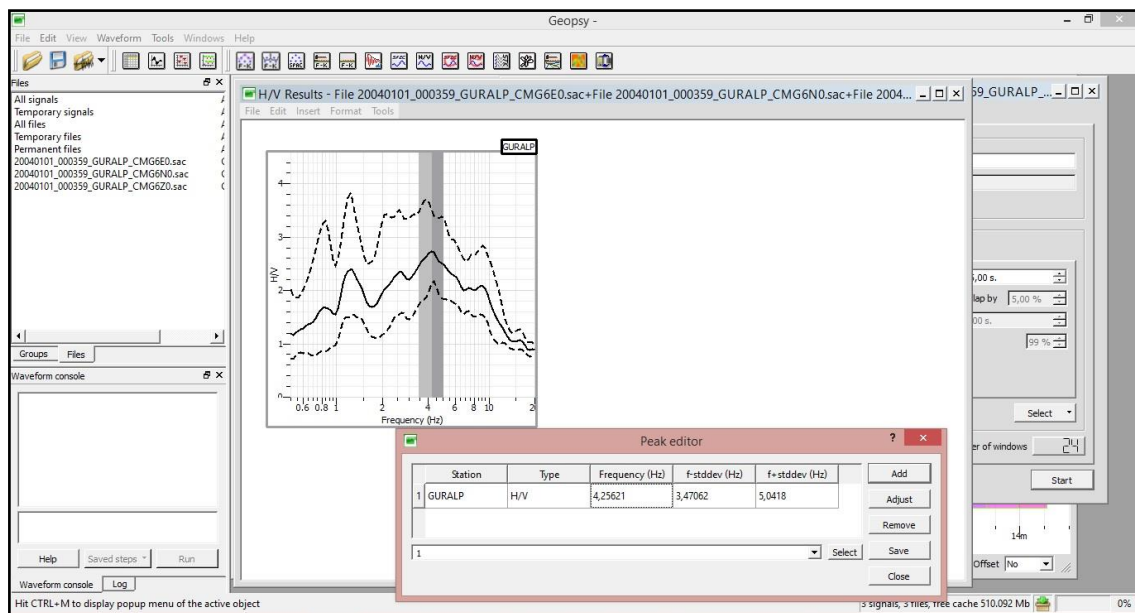


Figura 22 – Gráfico HVSR obtido e janela de leitura de resultados, software Geopsy.

### 3.3.2. Dinver

O software Dinver permite proceder à inversão do gráfico HVSR começando por apresentar a curva elipticidade do gráfico H/V e após introdução de parâmetros de velocidade de ondas de compressão e cisalhamento, coeficiente de Poisson e densidade, permite a criação de um gráfico, designado no programa como *Ground Profile* e que representa a velocidade propagação das ondas P e S em função da profundidade.

É importante notar que apenas o gráfico de velocidade de propagação das ondas S é resultado da inversão da curva HVSR, o gráfico de velocidade de propagação das ondas P é calculado através do gráfico Vs. Por este motivo, neste trabalho, apenas se utilizou os gráficos Vs, de forma a tentar minimizar o erro.

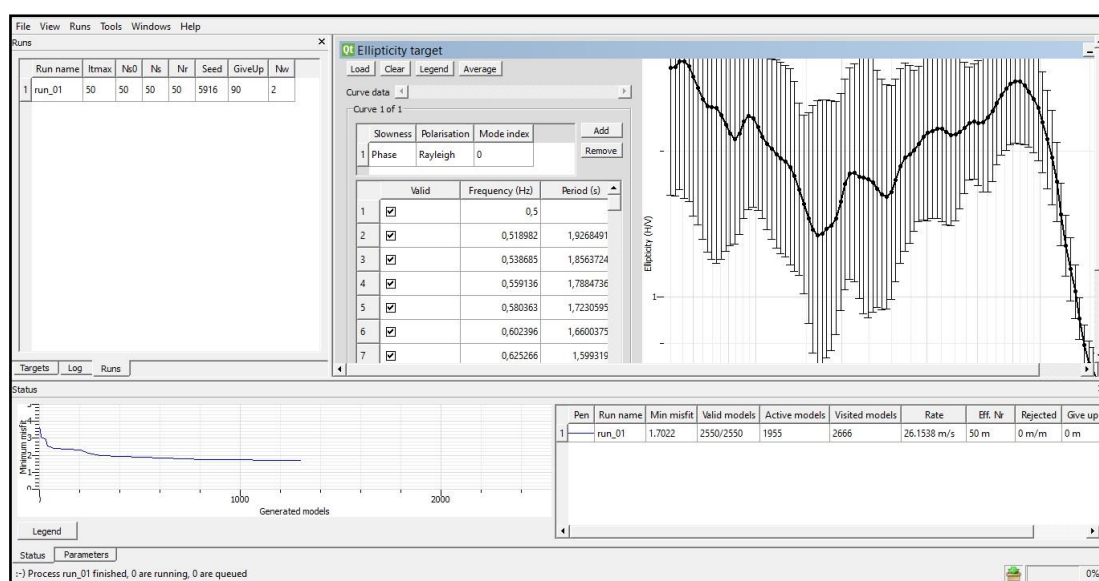


Figura 23 – Menu de processamento do software Dinver, com representação da curva de elipticidade.

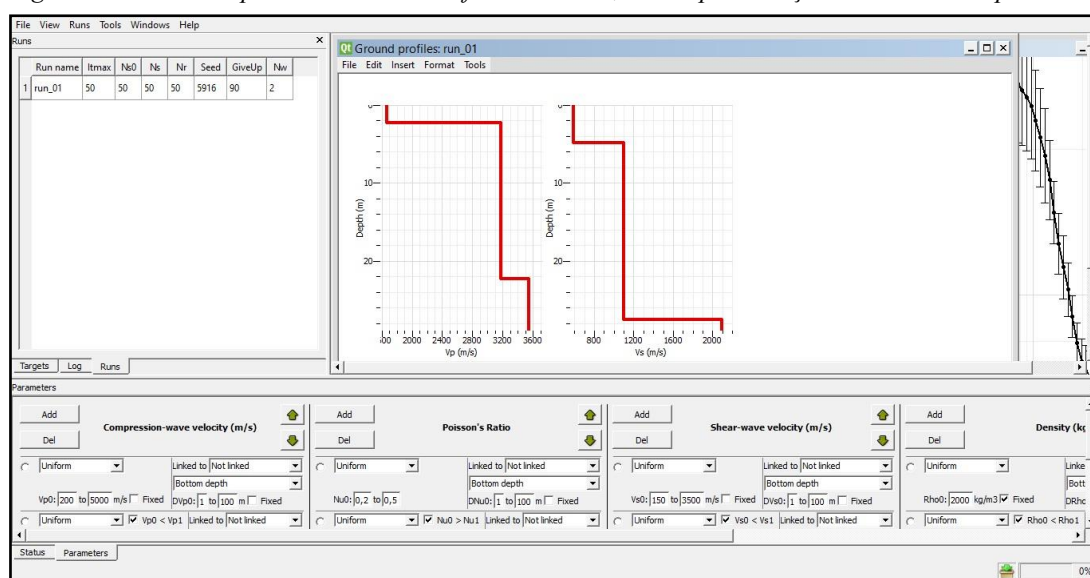


Figura 24 – Menu de configuração dos parâmetros de criação dos gráficos velocidade vs. profundidade, software Dinver.

### 3.3.3. Excel

Pela observação directa, quer dos gráficos HVSR quer dos gráficos *Ground Profile*, foi possível retirar as seguintes informações, relativas a cada ponto amostrado:

- Valores de frequência fundamental ( $f_0$ );
- Valores de amplitude da frequência fundamental ( $A_0$ );
- Valores de velocidade de S para limites entre camadas do solo ( $V_s$ );
- Valores de profundidade para os limites referidos acima (*Depth*).

Com base nestes resultados construiu-se uma tabela excel e acrescentou-se, para cada ponto, valores de coordenadas (x, y), valores de cotas superficiais, unidade geotécnica correspondente a cada local, grau de resistência da unidade geotécnica (esperada), valores reais de profundidade de cada camada observada.

### 3.3.4. ArcGIS – ArcMap e ArcScene

Tendo-se reunindo todos os dados obtidos através dos softwares Geopsy e Dinver no citado ficheiro Excel, recorreu-se ao sistema de informação geográfica ArcGIS, da empresa ESRI (<https://www.esri.com/en-us/home>), para a construção de mapas e interpretação dos resultados.

#### Interpolação - ArcMap

Tendo como objectivo extrapolar informações para áreas não amostradas, recorreu-se ao algoritmo de interpolação designado por *inverso ponderado da distância* (designado pela sigla IDW no ambiente do programa – “*inverse distance weight*”).

Durante a interpolação, este algoritmo, atribui um peso a cada ponto amostrado de acordo com a sua proximidade ou distância ao nó que está a ser calculado. Sendo assim, a influência de um ponto amostrado em relação a outro ponto diminui com a distância entre esse ponto amostrado e o nó da malha que está a ser calculada (Landim, 2000).

Para construção dos mapas de interpolação utilizaram-se os seguintes dados:

- Valores de frequência fundamental ( $f_0$ );
- Valores de amplitude da frequência fundamental ( $A_0$ );
- Valores de velocidade de S para as diferentes camadas subterrâneas atingidas ( $V_s$ );
- Valores de profundidade dos limites entre camadas subterrâneas (local onde

se verifica uma clara alteração da velocidade de S) (DepthS).

Deste processo resultou um conjunto de seis mapas de interpolação, estes mapas foram construídos excluindo os pontos 1, 3, 17 e 19, uma vez que os pontos 25, 28, 29 e 30, foram recolhidos nos mesmos locais, respetivamente. Desta forma deu-se maior representatividade aos dados recolhidos com o segundo equipamento.

#### **TIN (*Triangulated Irregular Network*) - ArcMap**

Como já foi referido, para cada ponto amostrado, foi possível subtrair à sua cota superficial, o valor, em metros, da espessura das camadas subterrâneas interpretadas pela diferença registada de valores de velocidade de S, e obter desta forma um valor aproximado da profundidade real de cada camada do solo.

Tendo disponível esta informação em ambiente ArcGIS, procurou-se construir um modelo topográfico digital que representasse de forma aproximada o modelo topográfico subterrâneo, portanto, o cripto relevo dos limites entre camadas geotécnicas.

Este modelo tem por base uma interpolação de resultados recorrendo ao mesmo algoritmo já referido, o inverso ponderado da distância, formando uma rede de triângulos, com base nos pontos irregularmente espaçados que correspondem aos pontos amostrados e fornecidos ao programa.

Deste processamento resulta um modelo 2D daquilo que será o modelado do terreno, neste caso, em profundidade. Tendo em conta os resultados previamente obtidos pelos gráficos de profundidade do programa Dinver construíram-se os modelos referentes a dois limites entre camadas subterrâneas.

#### **Modelo de Elevação 3D - ArcScene**

Através da extensão ArcScene do software ArcGIS é possível proceder á visualização dos modelos citados anteriormente em ambiente 3D sendo assim possível obter o modelo em relevo da superfície em questão. Este efeito de visualização torna mais fácil a observação directa das diferenças de espessura das camadas do solo em diferentes pontos amostrados e de diferentes ângulos.

### 3.4. Teste ao critério de recolha de dados – tempo de gravação

Numa fase inicial do projecto procedeu-se a um pequeno teste relativo à influência do critério “tempo de gravação”. Segundo o manual do projecto SESAME, que como já foi referido, serve de base para este tipo de procedimentos, seria aconselhável uma gravação de 10 a 20 min de acordo com o limite mínimo de frequência fundamental que se pretende atingir (0,5 Hz a 1 Hz), tabela 4.

*Tabela 4 – Recomendações de tempos de gravação para o registo de ruído ambiente (SESAME, 2005).*

$f_0$ [Hz]	Valor mínimo de janela de tempo [s]	Valor mínimo de ciclos significativos ( $n_c$ )	Valor mínimo de janelas	Mínimo de sinal de gravação usável [s]	Tempo mínimo de gravação recomendado [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Uma vez que o primeiro equipamento utilizado, o sismómetro de banda larga CMG-6TD da Guralp Systems, necessita de alguns minutos iniciais para estabilização e por este motivo na análise de todas as gravações foram excluídos os primeiros momentos da gravação, pendia a questão da necessidade de proceder a períodos de gravação mais longos de modo a poder-se excluir partes indesejáveis da gravação (corrompidas pelo próprio funcionamento do equipamento).

Desta forma utilizou-se o local do Ponto 6 para testar esta influência, procedeu-se então a uma gravação de 10 minutos de ruído e logo de seguida uma gravação de 30 minutos consecutivos. Aquando da análise das gravações através do software Geopsy, os dados foram tratados de três formas distintas:

1. Construção da curva HVSR para o ficheiro de 10 minutos;
2. Construção da curva HVSR para o ficheiro completo de 30 minutos;
3. Divisão do ficheiro de 30 minutos em segmentos de 10 minutos construindo as respectivas curvas HVSR.

Obtiveram-se os seguintes resultados:

1. Ficheiro de 10 minutos:

$$f_0 \text{ (Hz)} = 0,650522$$

$$A_0 = 1,6119$$

2. Ficheiro completo de 30 minutos:

$$f_0 \text{ (Hz)} = 0,601138$$

$$A_0 = 1,62315$$

3. Segmentos de 10 minutos retirados do ficheiro de 30 minutos

- Segmento 1:

$$f_0 \text{ (Hz)} = 0,615693$$

- Segmento 2:

$$f_0 \text{ (Hz)} = 0,603734$$

- Segmento 3:

$$f_0 \text{ (Hz)} = 0,596894$$

Foi possível concluir que a utilização de um segmento de cerca de 10 minutos ou superior, neste ambiente urbano, fornece o mesmo resultado desde que seja assegurado que após a eliminação dos períodos de ruído transiente (e portanto, não utilizáveis) se mantenha um mínimo de 200s de gravação utilizável, que traduzido em parâmetros do programa de análise quer dizer que o sinal é divisível num mínimo de 10 janelas de tempo com um mínimo de 10s em cada janela de tempo. Neste estudo foram sempre respeitadas estas condições sendo que se obteve no mínimo 10 janelas de tempo com 15s cada e no máximo 26 janelas de tempo com 10s cada.

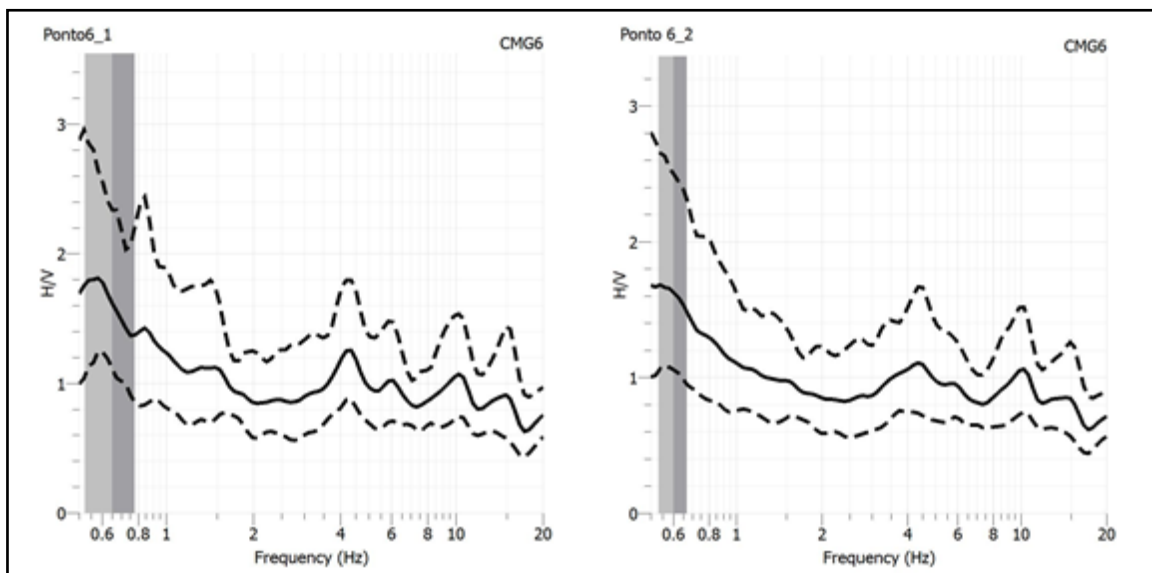


Figura 25 – Curvas HVSR para os ficheiros de 10 min. (1) e 30 min. (2) respectivamente.

### 3.5. Teste á fiabilidade dos equipamentos

Tendo em conta a utilização de dois equipamentos distintos e a necessidade de validar os resultados obtidos pelo primeiro equipamento (CMG-TD) uma vez que mais tarde este veio a experienciar dificuldades técnicas e problemas de gravação, procedeu-se à repetição de recolha de dados em alguns pontos repetidos. Esta nova recolha foi efectuada com o novo equipamento (GEOBOX) e procedeu-se a uma comparação dos dados obtidos sabendo que, este segundo equipamento é mais preciso e mais adequado a este tipo de estudos.

Repetiram-se as medições efectuadas nos pontos 1, 3, 17 e 19 que correspondem, respectivamente, aos pontos 25, 28, 29 e 30.

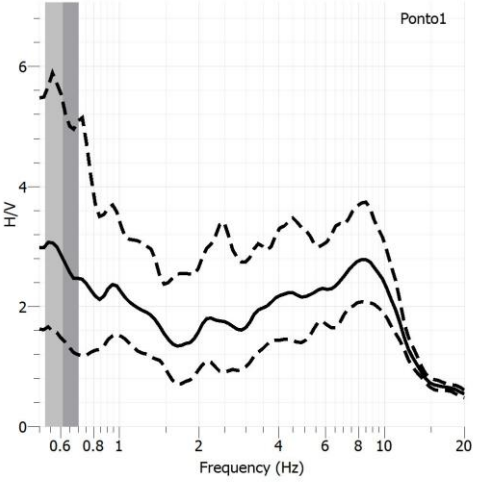
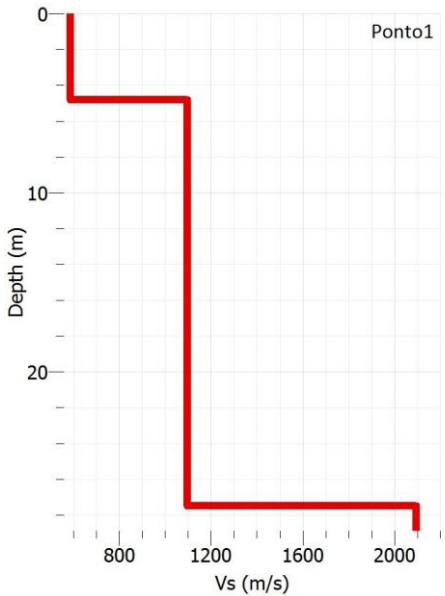
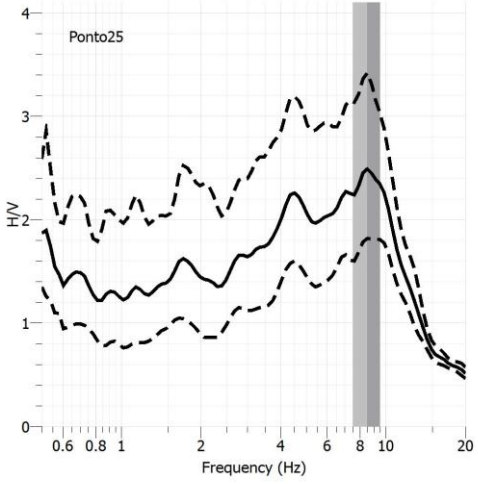
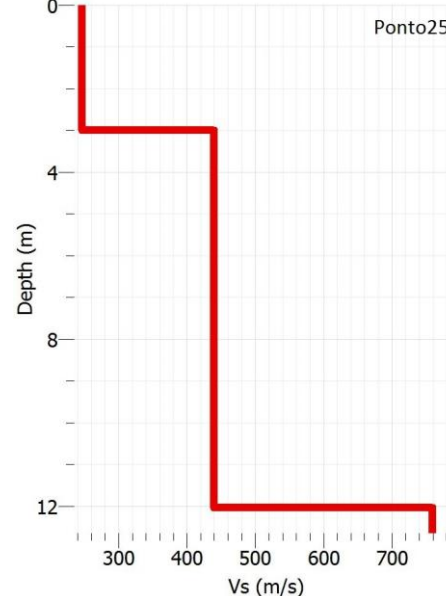
Esta escolha de pontos a repetir, para os pontos 1 e 3, deveu-se ao facto de os resultados iniciais para estes locais, nomeadamente, os valores de frequência fundamental ( $f_0$ ) terem suscitado dúvidas pela sua improbabilidade. A escolha dos pontos 17 e 19 para repetição foi aleatória.

Após comparação dos resultados obtidos (tabela 5) foi possível chegar às seguintes conclusões:

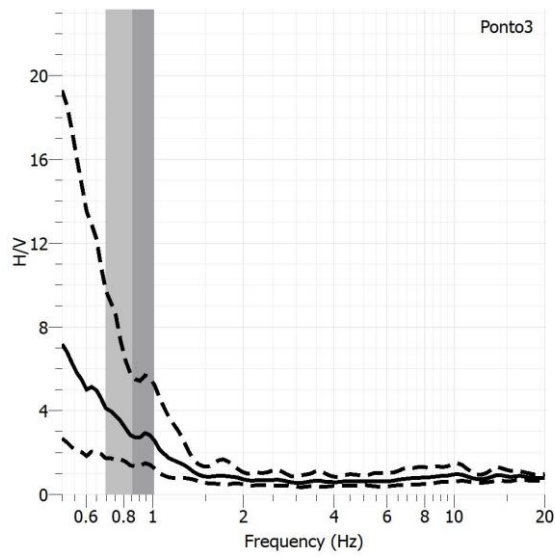
- Ligeiras variações nos valores da frequência fundamental ( $f_0$ ) podem dever-se à diferença de precisão e sensibilidade entre os dois equipamentos utilizados, mas variações mais acentuadas podem ser relativas à existência ou ausência de certas fontes de ruído próximas (normalmente de causa antrópica) entre medições.
- Variações encontradas ao nível de valores de velocidade ou profundidade dos locais de descontinuidade (ruptura) devem-se às variações do valor de  $f_0$  e da curva HVSR obtidos em cada ponto amostrado, uma vez que o gráfico do perfil do solo se obtém através da inversão da curva de HVSR.



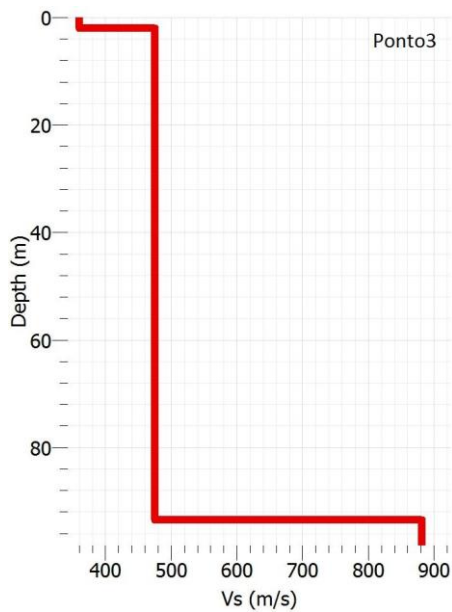
Tabela 5- Comparação dos resultados obtidos no software Geopsy e Dinver em pontos repetidos, amostrados com equipamentos diferentes.

CMG-6TD Guralp Systems	SR04S3 Geobox Sara Electronic Instruments
<p><b>Ponto 1</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_0 = 0,614549 \text{ Hz}</math></li> <li>• <math>A_0 = 2,77551</math></li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{S1} = 581,27 \text{ m/s}</math></li> <li>• <math>\text{Depth}_1 = 4,85 \text{ m}</math></li> <li>• <math>V_{S2} = 1091,20 \text{ m/s}</math></li> <li>• <math>\text{Depth}_2 = 27,63 \text{ m}</math></li> </ul>	<p><b>Ponto 25</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_0 = 8,51914 \text{ Hz}</math></li> <li>• <math>A_0 = 2,48823</math></li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{S1} = 242,68 \text{ m/s}</math></li> <li>• <math>\text{Depth}_1 = 3,01 \text{ m}</math></li> <li>• <math>V_{S2} = 436,82 \text{ m/s}</math></li> <li>• <math>\text{Depth}_2 = 12,05 \text{ m}</math></li> </ul>

### Ponto 3

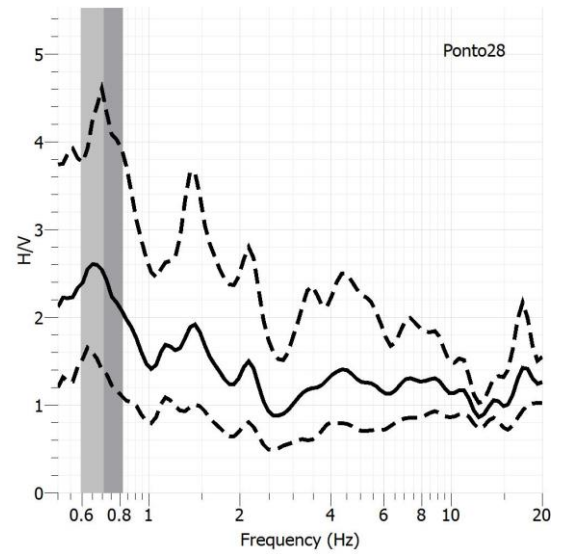


- $f_0 = 0,855059 \text{ Hz}$
- $A_0 = 2,78488$

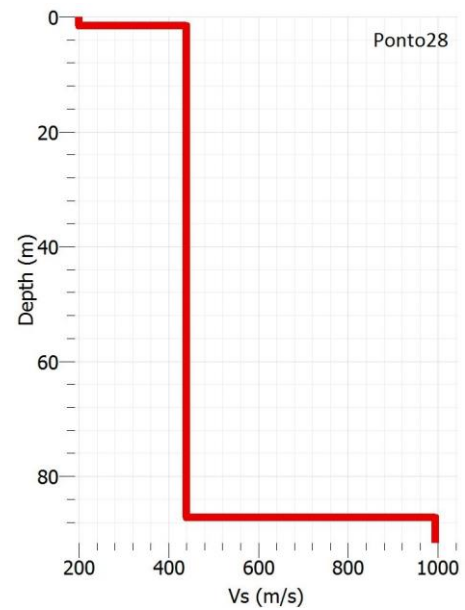


- $V_{S1} = 356,43 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 2,10 \text{ m}$
- $V_{S2} = 468,57 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 93,95 \text{ m}$

### Ponto 28

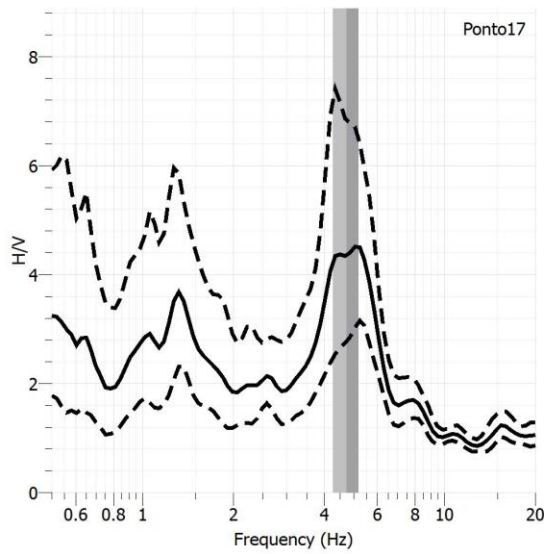


- $f_0 = 0,708948 \text{ Hz}$
- $A_0 = 2,49746$

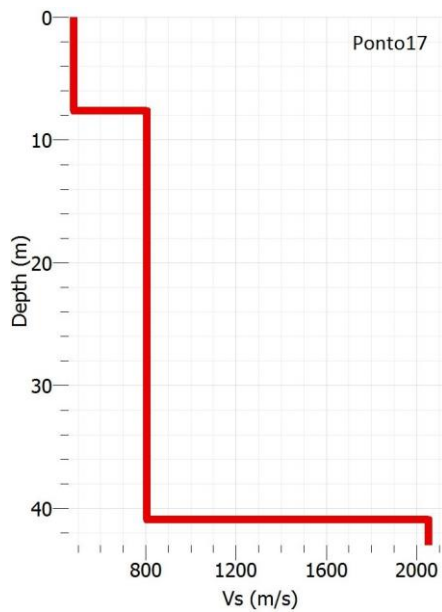


- $V_{S1} = 194,37 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 1,95 \text{ m}$
- $V_{S2} = 433,87 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 87,30 \text{ m}$

### Ponto 17

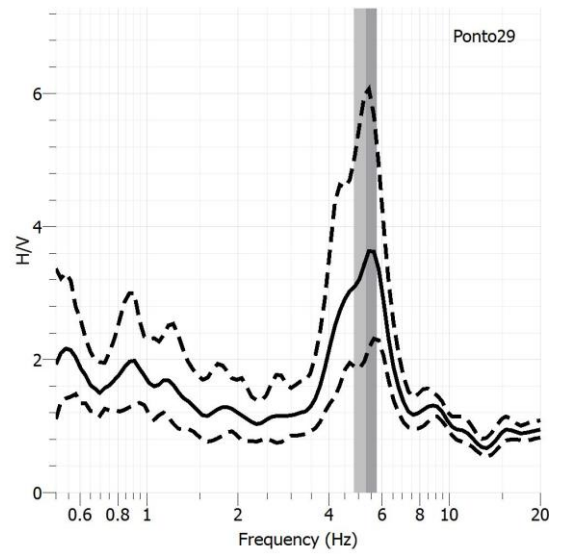


- $f_0 = 4,73228 \text{ Hz}$
- $A_0 = 4,35914$

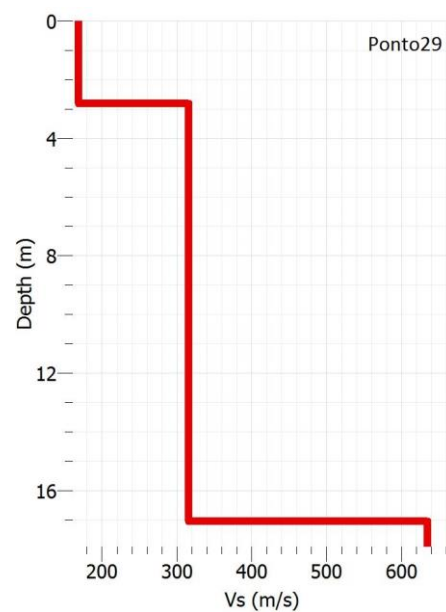


- $V_{S1} = 473,23 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 7,80 \text{ m}$
- $V_{S2} = 799,88 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 40,98 \text{ m}$

### Ponto 29

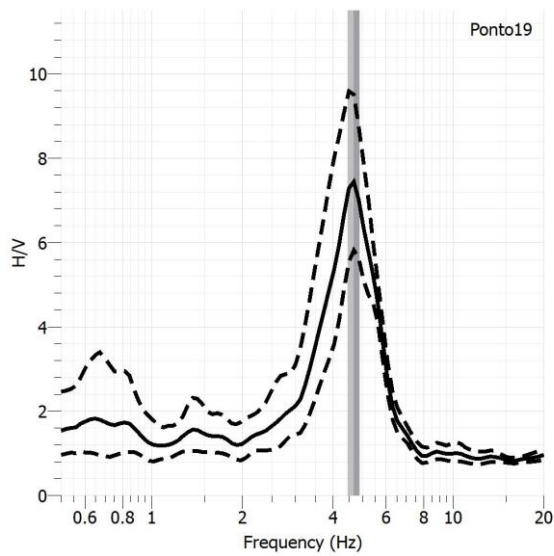


- $f_0 = 5,30463 \text{ Hz}$
- $A_0 = 3,51422$

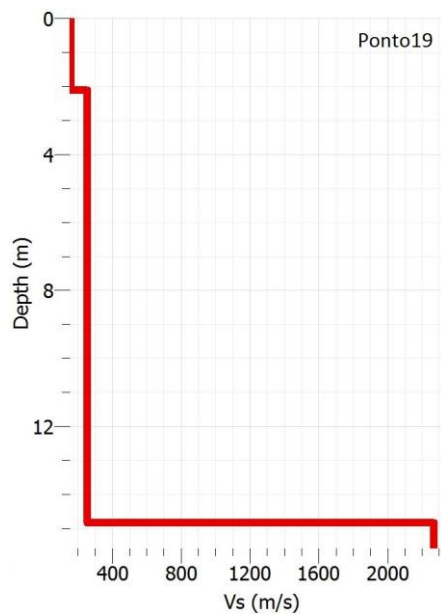


- $V_{S1} = 165,56 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 2,80 \text{ m}$
- $V_{S2} = 312,64 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 17,07 \text{ m}$

### Ponto 19

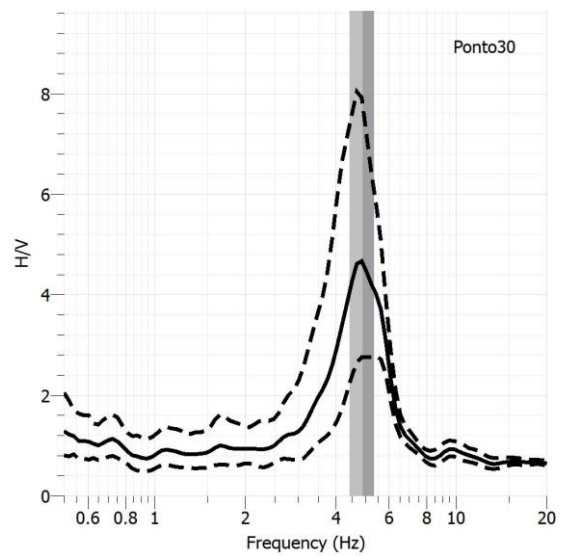


- $f_0 = 4,68126 \text{ Hz}$
- $A_0 = 7,4289$

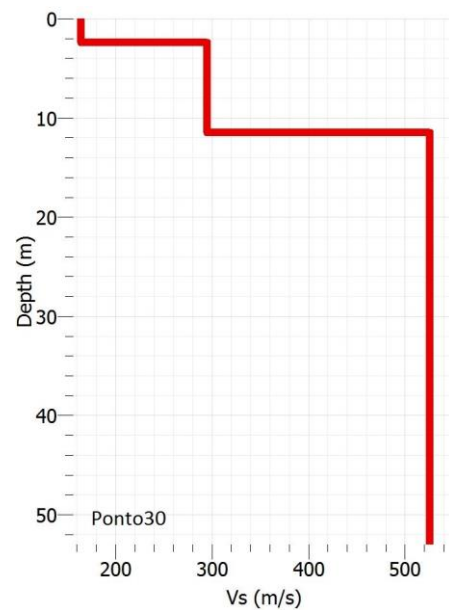


- $V_{S1} = 152,78 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 2,11 \text{ m}$
- $V_{S2} = 240,65 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 14,85 \text{ m}$

### Ponto 30



- $f_0 = 4,89833 \text{ Hz}$
- $A_0 = 4,61753$



- $V_{S1} = 161,70 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_1 = 2,64 \text{ m}$
- $V_{S2} = 292,38 \text{ m/s}$
- $\text{Depth}_2 = 11,68 \text{ m}$

## Capítulo 4 – Apresentação dos resultados

### 4.1. Resultados – Geopsy

Glossário de termos do programa Geopsy:

- $f_0$  = frequência do pico H/V
- $A_0$  = amplitude H/V em  $f_0$
- $f\text{-stddev}$  =  $f_0$  – desvio padrão
- $f\text{+stddev}$  =  $f_0$  + desvio padrão

#### Ponto1

- $f_0$  (Hz) = 0,614549
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,524707
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,704391
- $A_0$  = 2,77551

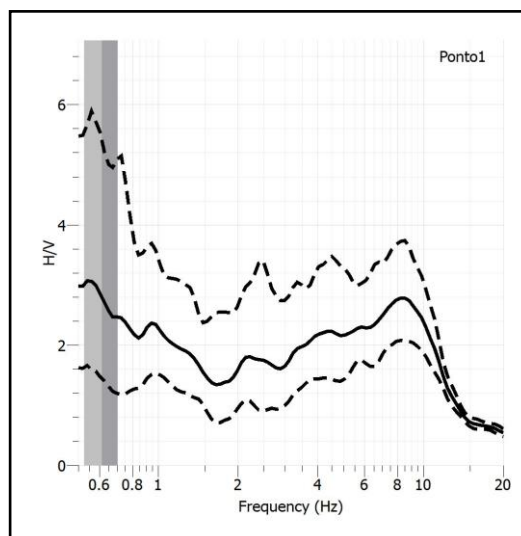


Gráfico 1 – Gráfico HVSr do ponto 1.

#### Ponto2

- $f_0$  (Hz) = 5,09544
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 4,85307
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 5,33781
- $A_0$  = 5,37235

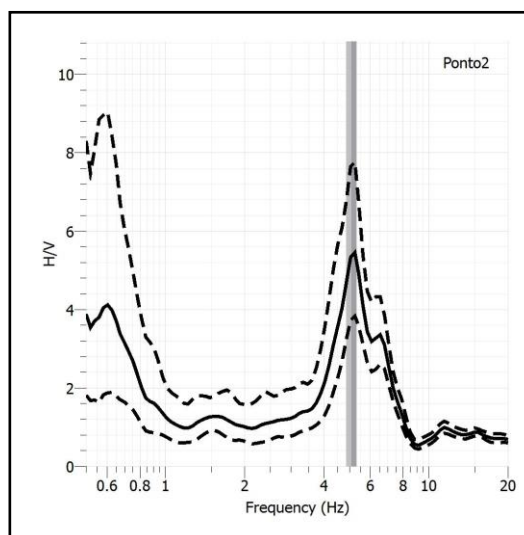
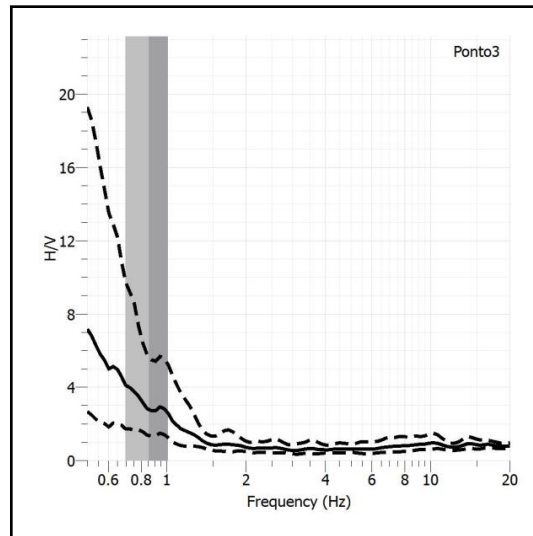


Gráfico 2 – Gráfico HVSr do ponto 2.

### Ponto3

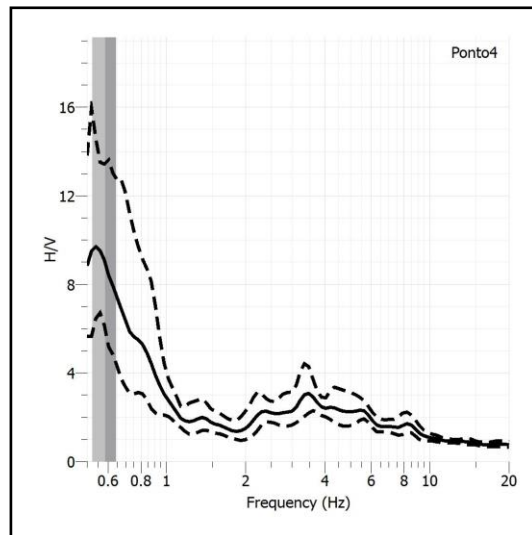
- $f_0$  (Hz) = 0,855059
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,698498
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 1,01162
- $A_0 = 2,78488$



*Gráfico 3 – Gráfico HVSR do ponto 3.*

### Ponto4

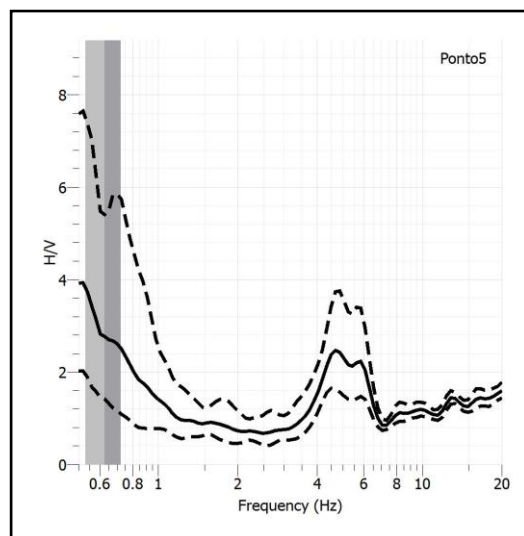
- $f_0$  (Hz) = 0,584962
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,523732
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,646192
- $A_0 = 8,95198$



*Gráfico 4 – Gráfico HVSR do ponto 4.*

### Ponto5

- $f_0$  (Hz) = 0,626276
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,531111
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,721442
- $A_0 = 2,76677$



*Gráfico 5 – Gráfico HVSR do ponto 5.*

### Ponto6

- $f_0$  (Hz) = 0,650622
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,523472
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,777571
- $A_0 = 1,6119$

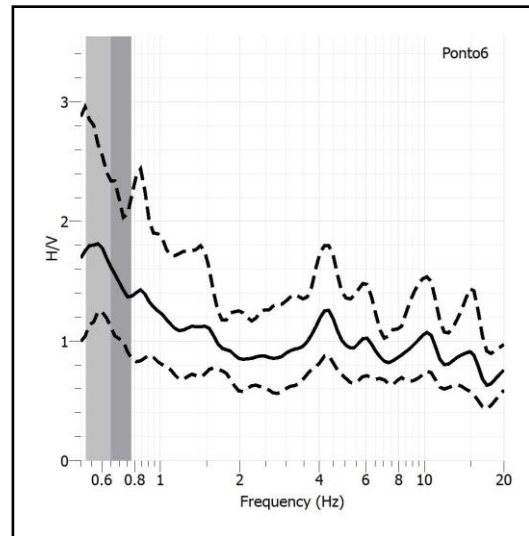


Gráfico 6 – Gráfico HVSR do ponto 6.

### Ponto7

- $f_0$  (Hz) = 1,34999
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 1,10662
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 1,59336
- $A_0 = 17,9233$

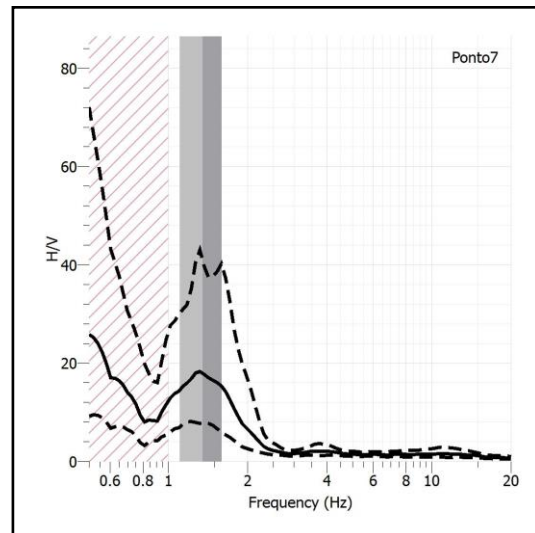


Gráfico 7 – Gráfico HVSR do ponto 7.

### Ponto8

- $f_0$  (Hz) = 0,763763
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,614207
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,91332
- $A_0 = 3,05729$

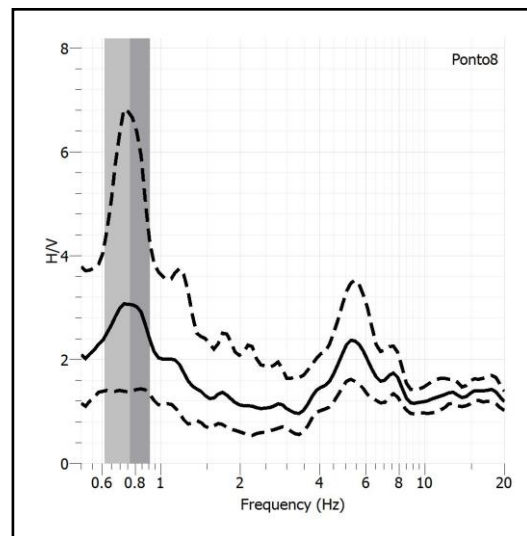
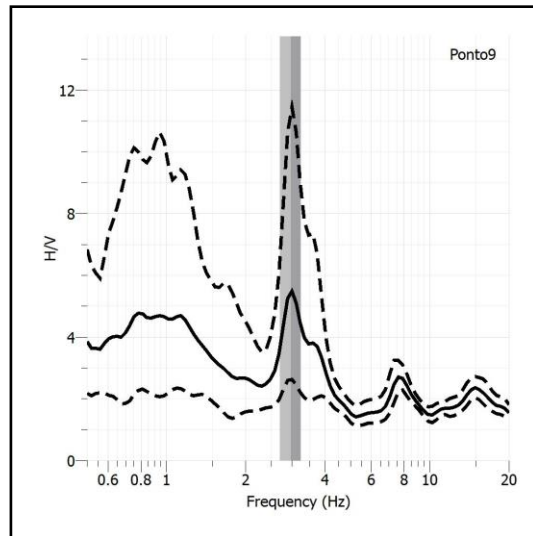


Gráfico 8 – Gráfico HVSR do ponto 8.

### Ponto9

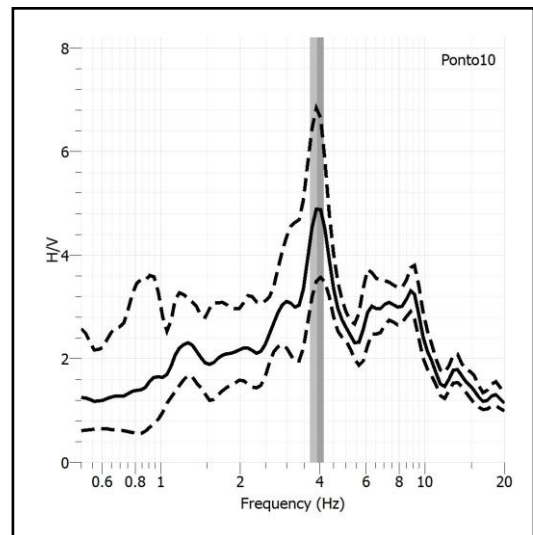
- $f_0$  (Hz) = 2,96895
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 2,70007
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 3,23783
- $A_0 = 5,44156$



*Gráfico 9 – Gráfico HVSR do ponto 9.*

### Ponto10

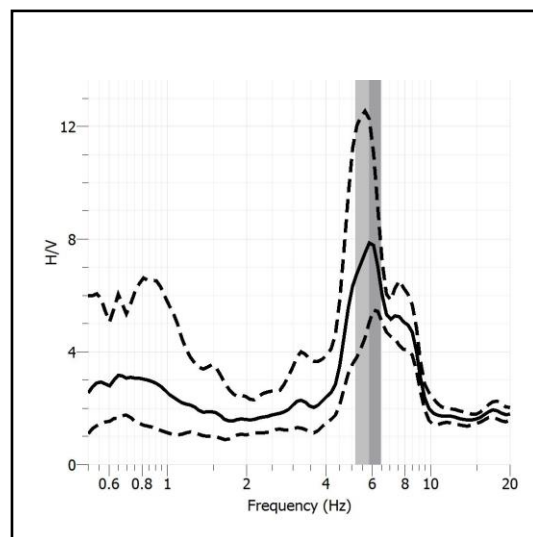
- $f_0$  (Hz) = 3,91008
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 3,67135
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 4,1488
- $A_0 = 4,8864$



*Gráfico 10 – Gráfico HVSR do ponto 10.*

### Ponto11

- $f_0$  (Hz) = 5,83473
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 5,17874
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 6,49072
- $A_0 = 7,84841$

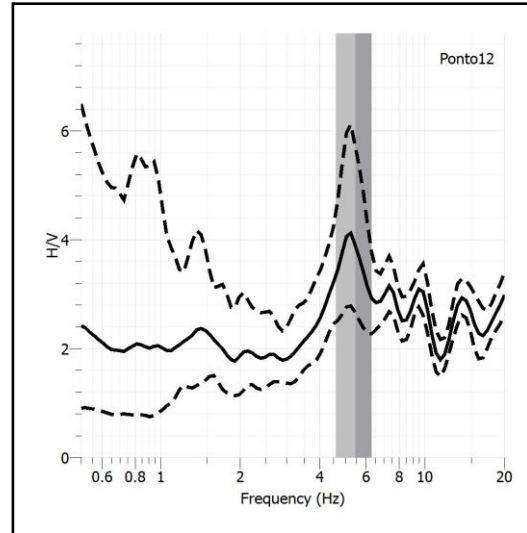


*Gráfico 12 – Gráfico HVSR do ponto 11.*



### Ponto12

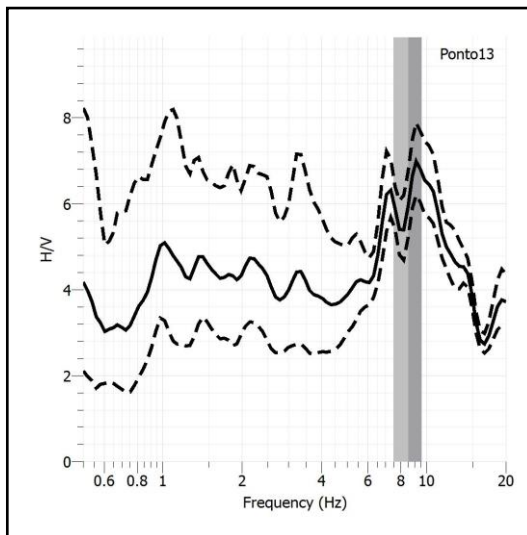
- $f_0 \text{ (Hz)} = 5,45554$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 4,60709$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 6,30399$
- $A_0 = 3,89637$



*Gráfico 14 – Gráfico HVSR do ponto 12.*

### Ponto13

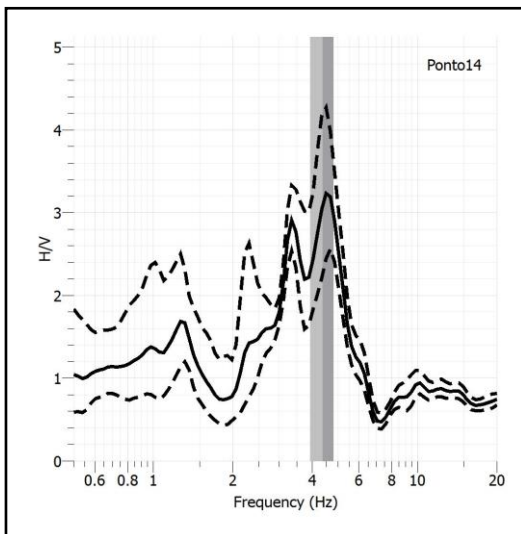
- $f_0 \text{ (Hz)} = 8,55032$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 7,51499$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 9,58566$
- $A_0 = 6,06232$



*Gráfico 15 – Gráfico HVSR do ponto 13.*

### Ponto14

- $f_0 \text{ (Hz)} = 4,37272$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 3,93295$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 4,81248$
- $A_0 = 3,0796$



*Gráfico 16 – Gráfico HVSR do ponto 14.*

### Ponto15

- $f_0$  (Hz) = 1,36852
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 1,13225
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 1,6048
- $A_0 = 1,78359$

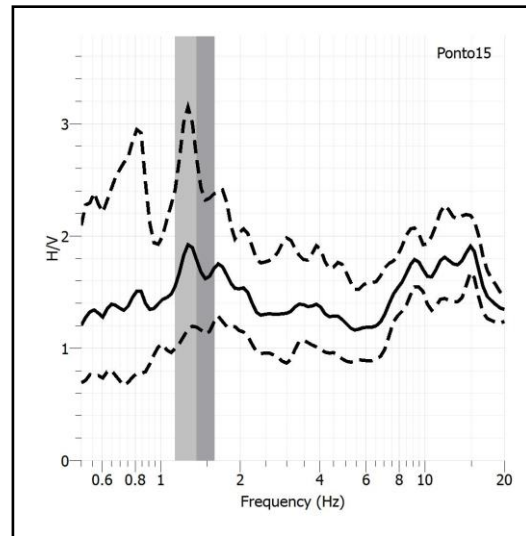


Gráfico 17 – Gráfico HVSR do ponto 15.

### Ponto16

- $f_0$  (Hz) = 7,61773
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 6,95916
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 8,2763
- $A_0 = 5,38508$

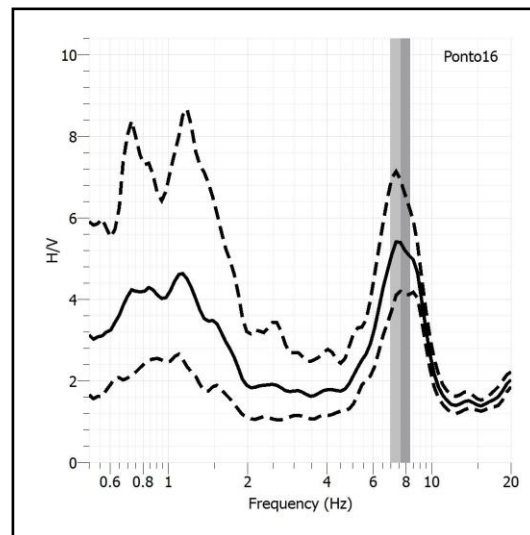


Gráfico 18 – Gráfico HVSR do ponto 16.

### Ponto17

- $f_0$  (Hz) = 4,73228
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 4,26662
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 5,19794
- $A_0 = 4,35914$

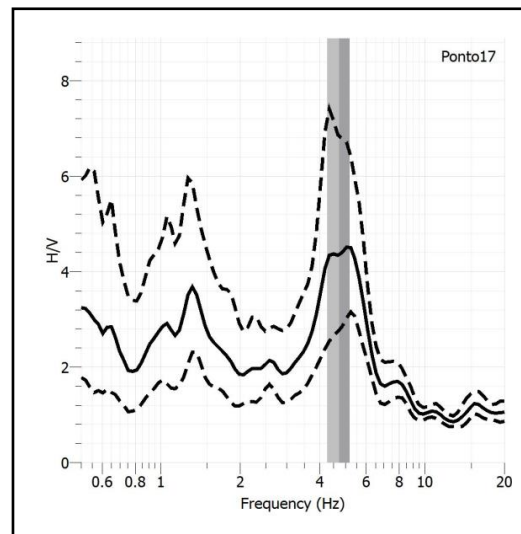


Gráfico 19 – Gráfico HVSR do ponto 17.

### Ponto18

- $f_0 \text{ (Hz)} = 4,89375$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 4,61153$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 5,17598$
- $A_0 = 6,88386$

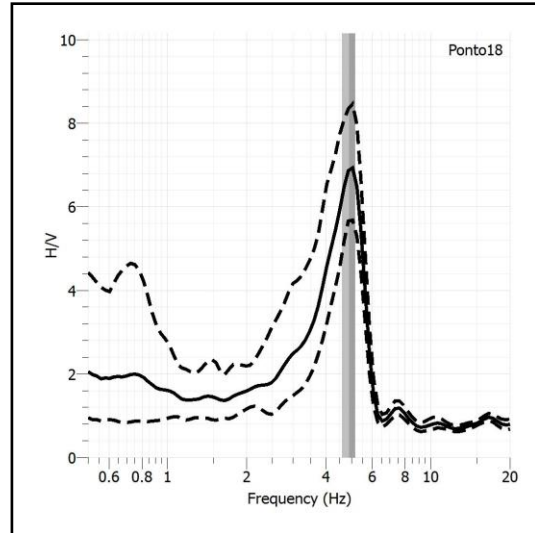


Gráfico 20 – Gráfico HVSr do ponto 18.

### Ponto19

- $f_0 \text{ (Hz)} = 4,68126$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 4,46276$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 4,89977$
- $A_0 = 7,42893$

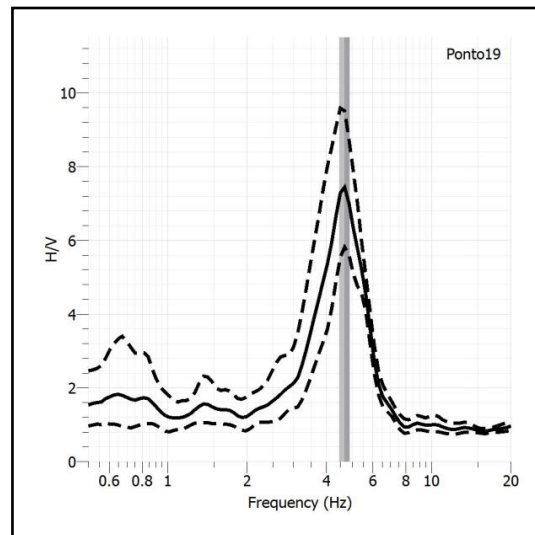


Gráfico 21 – Gráfico HVSr do ponto 19.

### Ponto20

- $f_0 \text{ (Hz)} = 6,31759$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 6,03275$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 6,60243$
- $A_0 = 7,74225$

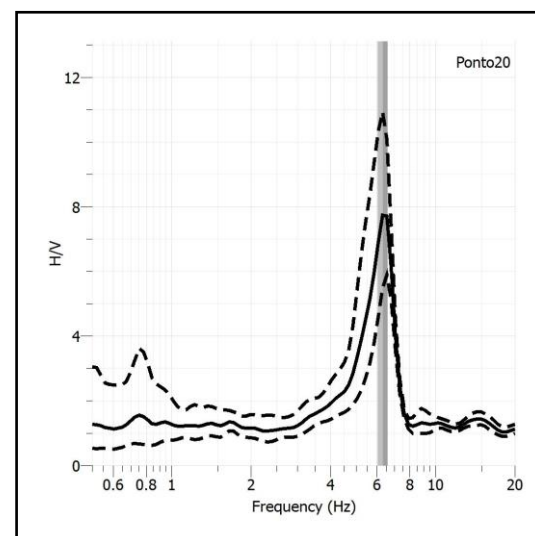


Gráfico 22 – Gráfico HVSr do ponto 20.

### Ponto21

- $f_0$  (Hz) = 4,25621
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 3,47062
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 5,0418
- $A_0 = 2,72645$

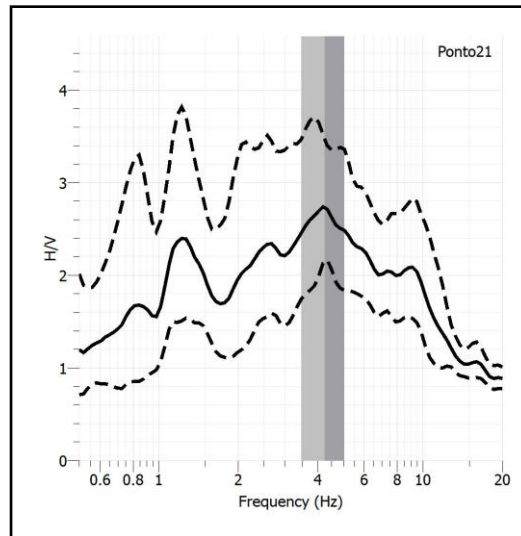


Gráfico 23 – Gráfico HVSR do ponto 21.

### Ponto22

- $f_0$  (Hz) = 5,41356
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 4,31719
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 6,50992
- $A_0 = 2,95633$

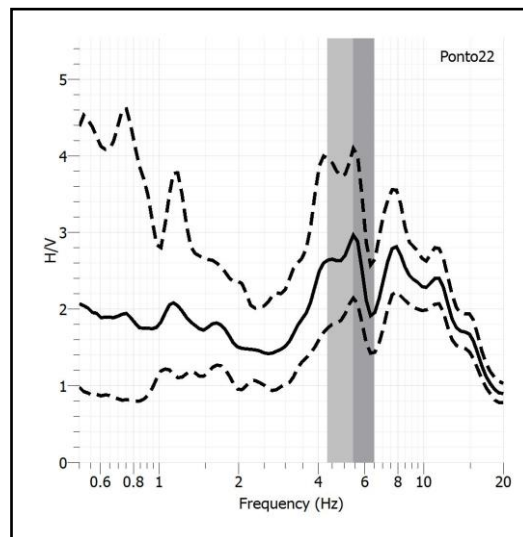


Gráfico 24 – Gráfico HVSR do ponto 22.

### Ponto23

- $f_0$  (Hz) = 13,1695
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 11,4531
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 14,886
- $A_0 = 2,03979$

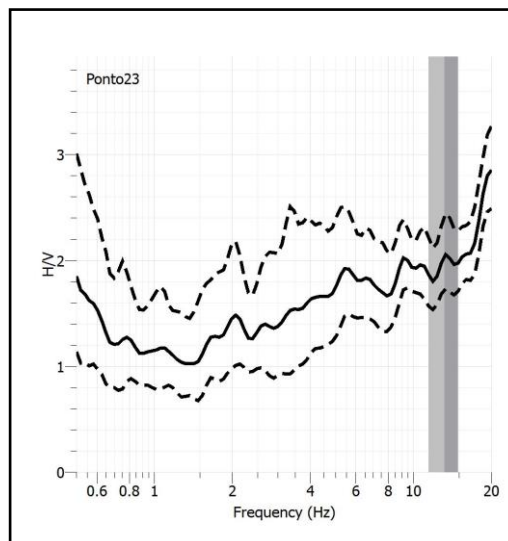


Gráfico 25 – Gráfico HVSR do ponto 23.

#### Ponto24

- $f_0 \text{ (Hz)} = 0,631267$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 0,560208$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 0,702326$
- $A_0 = 2,23979$

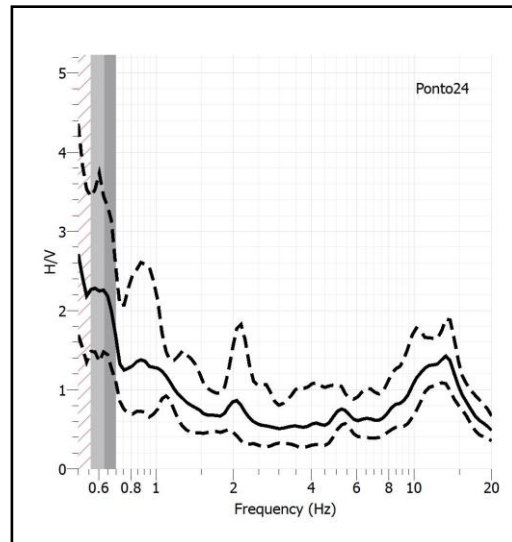


Gráfico 26 – Gráfico HVSR do ponto 24.

#### Ponto25

- $f_0 \text{ (Hz)} = 8,51914$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 7,50494$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 9,53334$
- $A_0 = 2,48823$

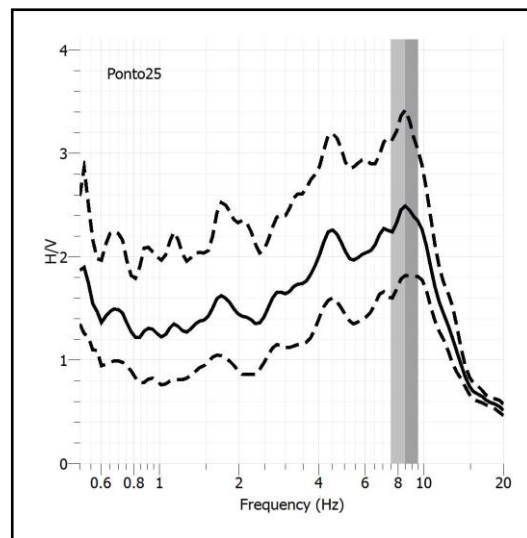


Gráfico 28 – Gráfico HVSR do ponto 25.

#### Ponto26

- $f_0 \text{ (Hz)} = 0,85872$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 0,753745$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 0,963696$
- $A_0 = 2,37304$

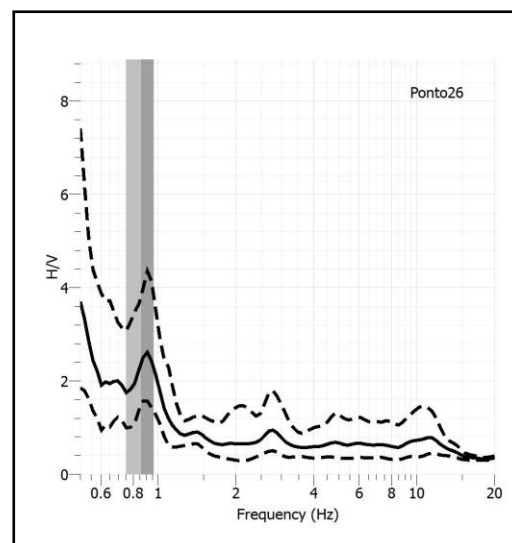


Gráfico 29 – Gráfico HVSR do ponto 26.

### Ponto27

- $f_0$  (Hz) = 1,12042
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,849912
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 1,39094
- $A_0 = 2,49454$

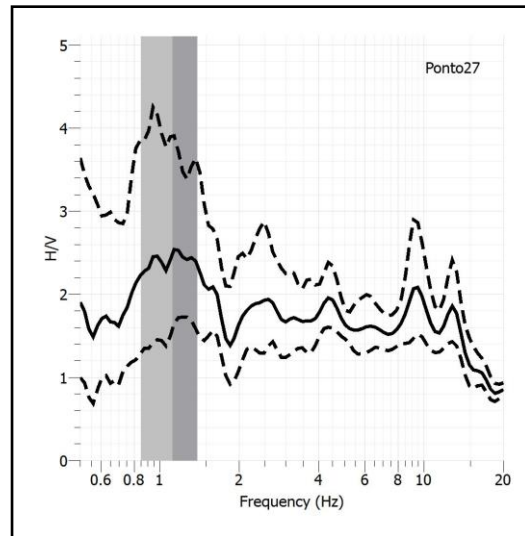


Gráfico 30 – Gráfico HVSr do ponto 27.

### Ponto28

- $f_0$  (Hz) = 0,708948
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 0,595277
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 0,822618
- $A_0 = 2,49746$

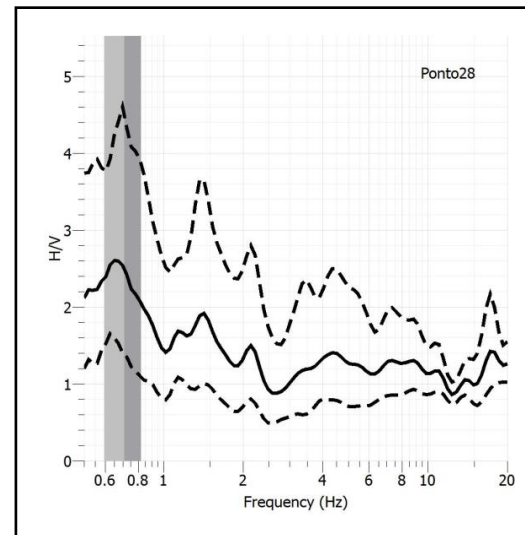


Gráfico 31 – Gráfico HVSr do ponto 28.

### Ponto29

- $f_0$  (Hz) = 5,30463
- $f\text{-stddev}$  (Hz) = 4,8491
- $f\text{+stddev}$  (Hz) = 5,76015
- $A_0 = 3,51422$

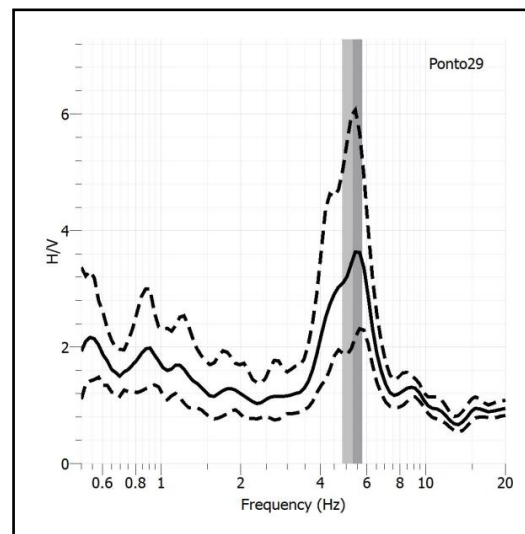
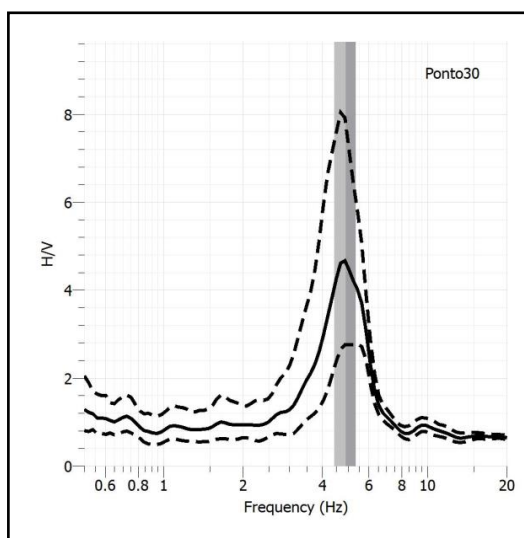


Gráfico 32 – Gráfico HVSr do ponto 29.

### Ponto30

- $f_0 \text{ (Hz)} = 4,89833$
- $f\text{-stddev (Hz)} = 4,43887$
- $f\text{+stddev (Hz)} = 5,35779$
- $A_0 = 4,61753$



*Gráfico 33 – Gráfico HVSR do ponto 30.*

## 4.2. Resultados – Dinver

Glossário de termos do programa Dinver:

- Misfit (ou desajuste) = “*root mean square*” (ou RMS) normalizada por desvios padrão (Mariotti & Sbirrazzuoli, 2009).
- Ground Profile Graph (GP) = progressão da velocidade das ondas P e S em profundidade. Daqui são retirados os valores de Vs (velocidade de S) e Vp (velocidade de P) com especial interesse nos valores correspondentes a variações/quebras e as correspondentes profundidades (Depth).

### Ponto1

- Minimum misfit = 1,61227
- Vs1 (m/s) = 581,27
- Depth1 (m) = 4,83
- Vs2 (m/s) = 1091,20
- Depth2 (m) = 27,63

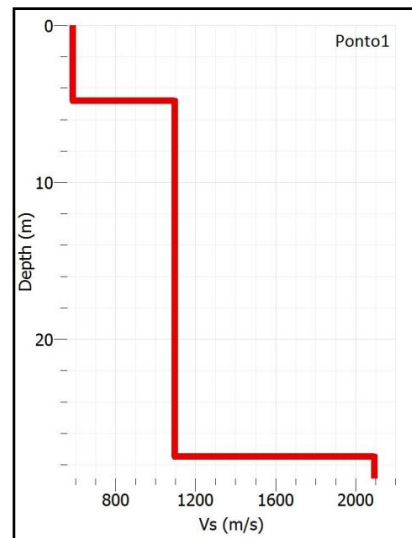


Gráfico 34 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 1.

### Ponto2

- Minimum misfit = 1,33568
- Vs1 (m/s) = 186,85
- Depth1 (m) = 2,24
- Vs2 (m/s) = 289,61
- Depth2 (m) = 14,44

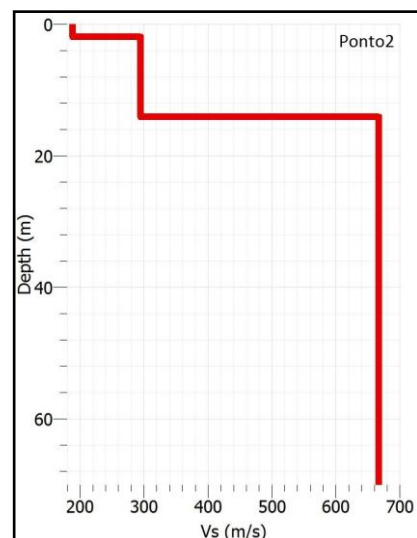


Gráfico 35 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 2.



### Ponto3

- Minimum misfit = 0,762302
- $V_{s1}$  (m/s) = 356,43
- Depth1 (m) = 2,10
- $V_{s2}$  (m/s) = 468,57
- Depth2 (m) = 93,95

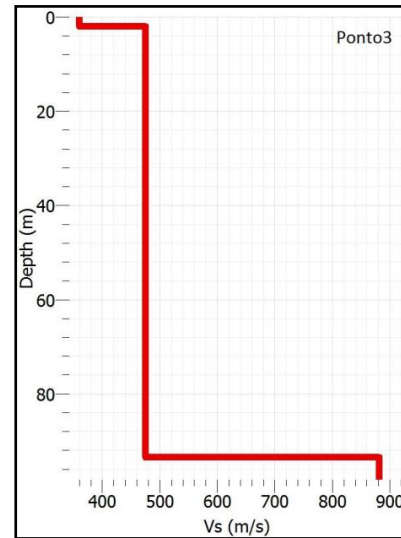


Gráfico 36 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 3.

### Ponto4

- Minimum misfit = 2,64846
- $V_{s1}$  (m/s) = 786,92
- Depth1 (m) = 9,05
- $V_{s2}$  (m/s) = 1440,87
- Depth2 (m) = 49,51

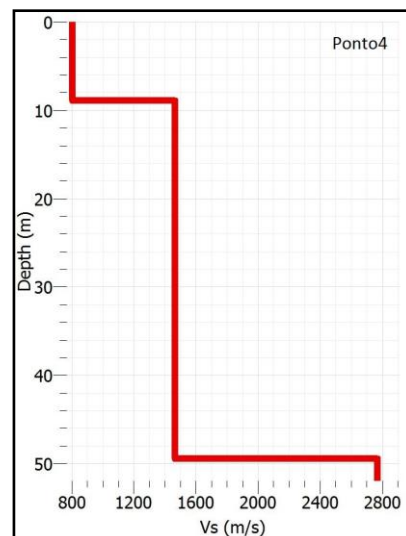
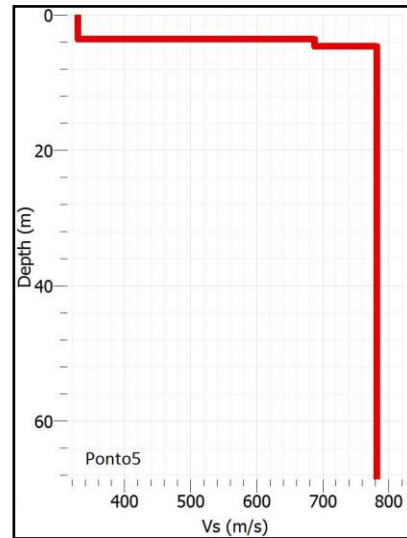


Gráfico 37 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 4.

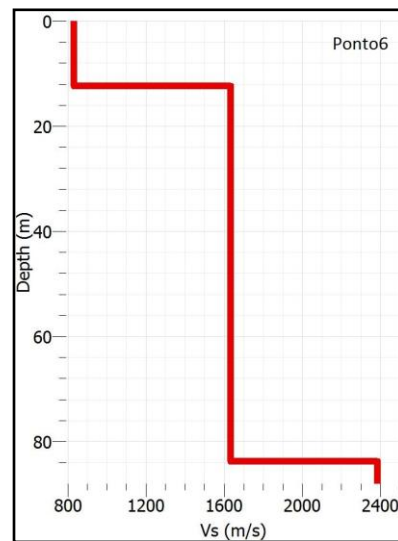
#### Ponto5

- Minimum misfit = 1,24817
- $V_{s1}$  (m/s) = 327,79
- Depth1 (m) = 3,66
- $V_{s2}$  (m/s) = 686,20
- Depth2 (m) = 4,88



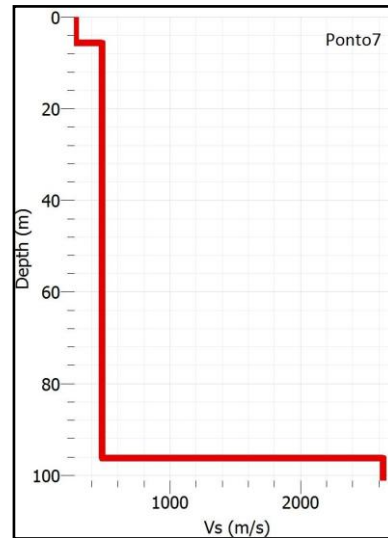
#### Ponto6

- Minimum misfit = 0,77666
- $V_{s1}$  (m/s) = 822,82
- Depth1 (m) = 12,52
- $V_{s2}$  (m/s) = 1625,36
- Depth2 (m) = 84,21



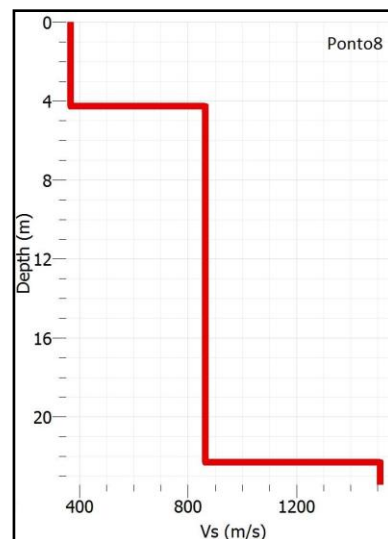
#### Ponto7

- Minimum misfit = 1,77488
- $V_{s1}$  (m/s) = 264,08
- Depth1 (m) = 5,76
- $V_{s2}$  (m/s) = 467,28
- Depth2 (m) = 96,44



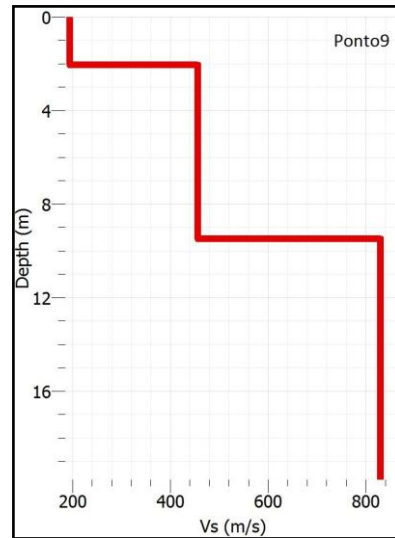
#### Ponto8

- Minimum misfit = 1,15178
- $V_{s1}$  (m/s) = 361,10
- Depth1 (m) = 4,25
- $V_{s2}$  (m/s) = 860,12
- Depth2 (m) = 22,34



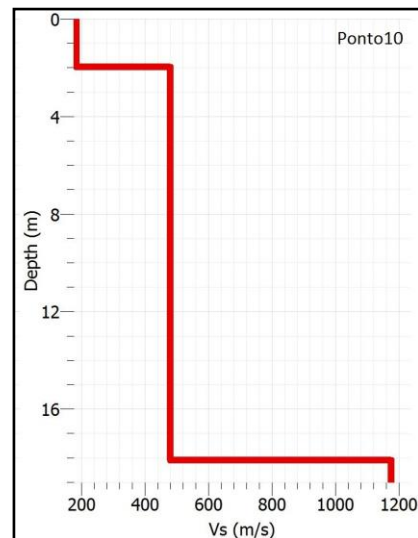
#### Ponto9

- Minimum misfit = 2,10837
- $V_{s1}$  (m/s) = 191,35
- Depth1 (m) = 2,04
- $V_{s2}$  (m/s) = 452,13
- Depth2 (m) = 9,50



#### Ponto10

- Minimum misfit = 2,48334
- $V_{s1}$  (m/s) = 175,62
- Depth1 (m) = 2,03
- $V_{s2}$  (m/s) = 473,19
- Depth2 (m) = 18,12



#### Ponto11

- Minimum misfit = 2,23658
- $V_{s1}$  (m/s) = 314,52
- Depth1 (m) = 5,04
- $V_{s2}$  (m/s) = 774,95
- Depth2 (m) = 23,71

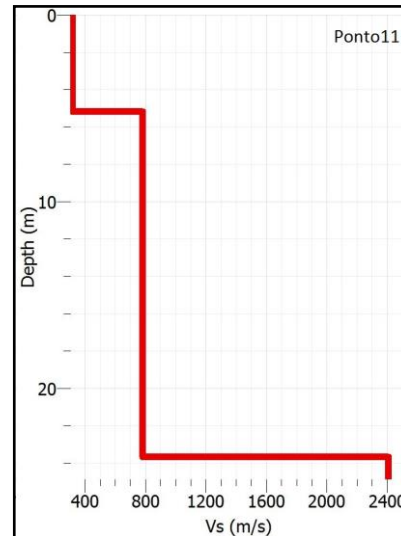


Gráfico 44 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 11.

#### Ponto12

- Minimum misfit = 2,21171
- $V_{s1}$  (m/s) = 178,70
- Depth1 (m) = 2,01
- $V_{s2}$  (m/s) = 549,81
- Depth2 (m) = 12,79

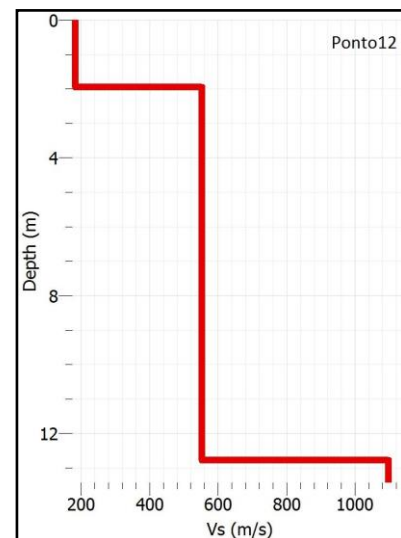


Gráfico 45 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 12.

### Ponto13

- Minimum misfit = 3,98475
- $V_{s1}$  (m/s) = 210,06
- Depth1 (m) = 3,66
- $V_{s2}$  (m/s) = 775,24
- Depth2 (m) = 20,02

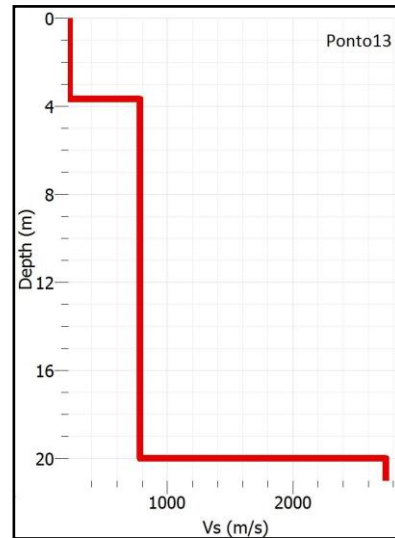


Gráfico 46 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 13.

### Ponto14

- Minimum misfit = 1,26545
- $V_{s1}$  (m/s) = 165,62
- Depth1 (m) = 1,70
- $V_{s2}$  (m/s) = 228,77
- Depth2 (m) = 15,52

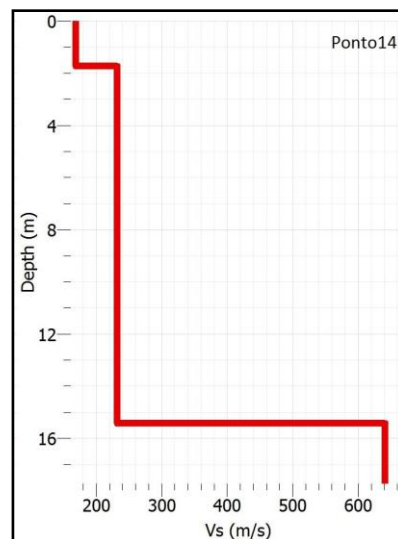


Gráfico 47 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 14.

#### Ponto15

- Minimum misfit = 1,3319
- $V_{s1}$  (m/s) = 431,02
- Depth1 (m) = 4,71
- $V_{s2}$  (m/s) = 1024,90
- Depth2 (m) = 20,02

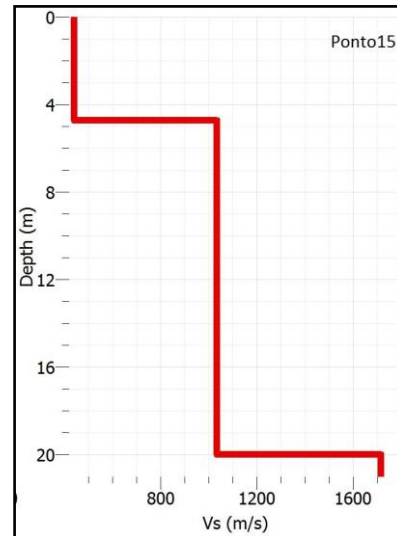


Gráfico 48 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 15.

#### Ponto16

- Minimum misfit = 2,75541
- $V_{s1}$  (m/s) = 303,66
- Depth1 (m) = 5,12
- $V_{s2}$  (m/s) = 723,50
- Depth2 (m) = 20,30

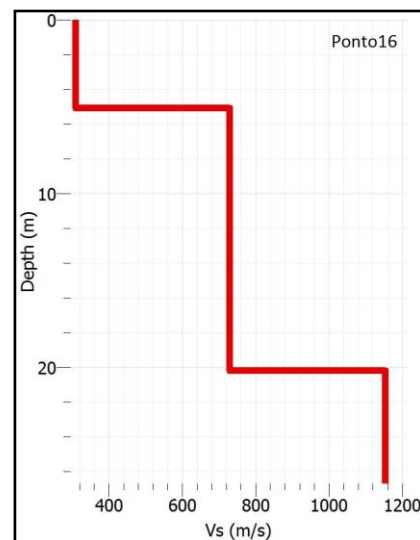
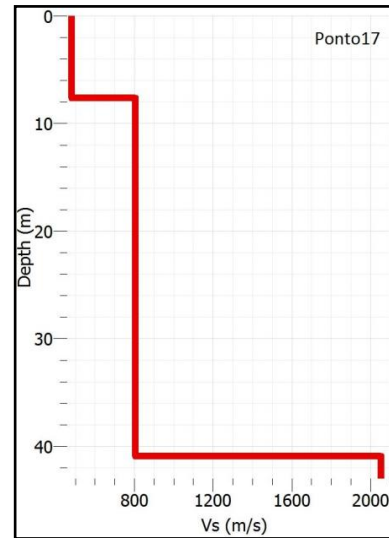


Gráfico 49 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 16.

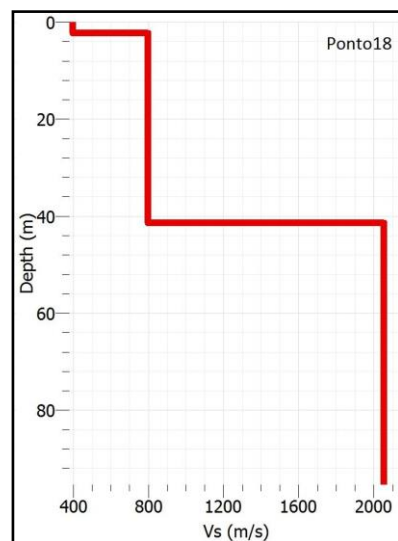
#### Ponto17

- Minimum misfit = 1,69149
- $V_{s1}$  (m/s) = 473,23
- Depth1 (m) = 7,80
- $V_{s2}$  (m/s) = 799,88
- Depth2 (m) = 40,98



#### Ponto18

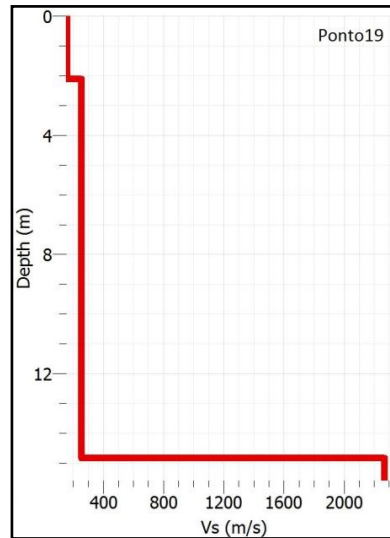
- Minimum misfit = 2,11677
- $V_{s1}$  (m/s) = 386,60
- Depth1 (m) = 2,71
- $V_{s2}$  (m/s) = 780,95
- Depth2 (m) = 41,69





#### Ponto19

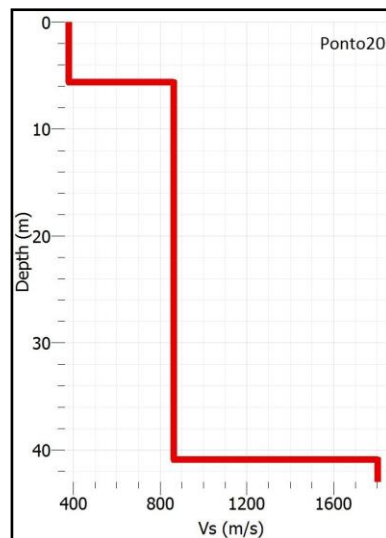
- Minimum misfit = 1,75121
- $V_{s1}$  (m/s) = 152,78
- Depth1 (m) = 2,11
- $V_{s2}$  (m/s) = 240,65
- Depth2 (m) = 14,85



*Gráfico 52 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 19.*

#### Ponto20

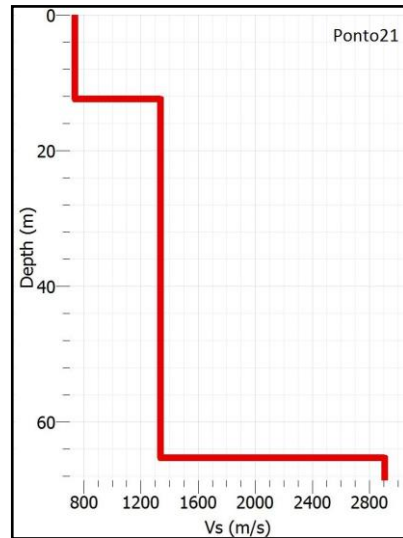
- Minimum misfit = 1,70601
- $V_{s1}$  (m/s) = 374,63
- Depth1 (m) = 5,66
- $V_{s2}$  (m/s) = 858,75
- Depth2 (m) = 41,14



*Gráfico 53 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 20.*

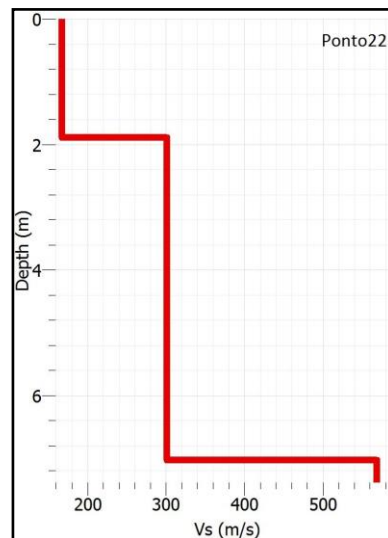
#### Ponto21

- Minimum misfit = 1,46889
- $V_{s1}$  (m/s) = 723,42
- Depth1 (m) = 12,45
- $V_{s2}$  (m/s) = 1326,69
- Depth2 (m) = 65,66



#### Ponto22

- Minimum misfit = 1,58928
- $V_{s1}$  (m/s) = 165,28
- Depth1 (m) = 1,92
- $V_{s2}$  (m/s) = 299,56
- Depth2 (m) = 7,07



### Ponto23

- Minimum misfit = 1,31957
- $V_{s1}$  (m/s) = 648,86
- Depth1 (m) = 5,00
- $V_{s2}$  (m/s) = 1170,49
- Depth2 (m) = 19,54

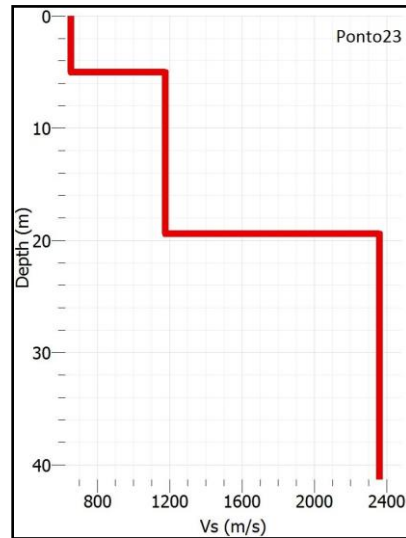


Gráfico 56 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 23.

### Ponto24

- Minimum misfit = 0,858214
- $V_{s1}$  (m/s) = 301,58
- Depth1 (m) = 3,91
- $V_{s2}$  (m/s) = 569,55
- Depth2 (m) = 87,30

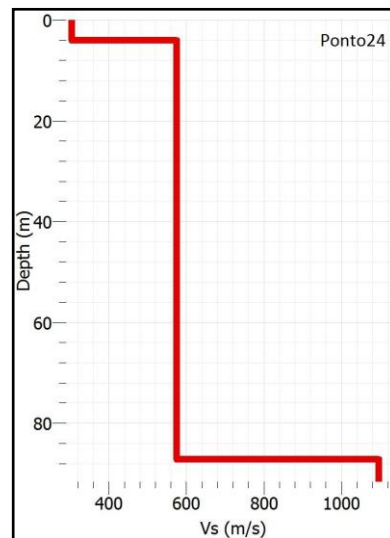
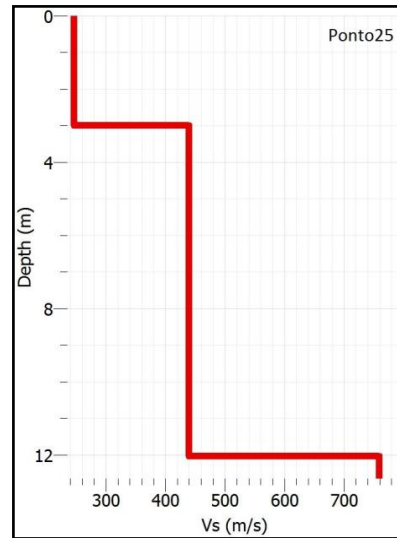


Gráfico 57 – Gráfico “Ground Profile” do ponto 24.

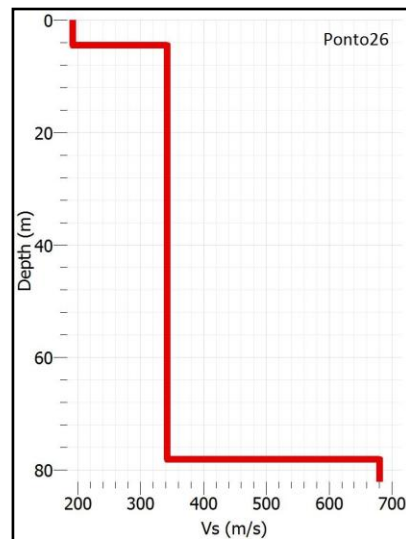
#### Ponto25

- Minimum misfit = 1,39968
- $V_{s1}$  (m/s) = 242,68
- Depth1 (m) = 3,01
- $V_{s2}$  (m/s) = 436,82
- Depth2 (m) = 12,05



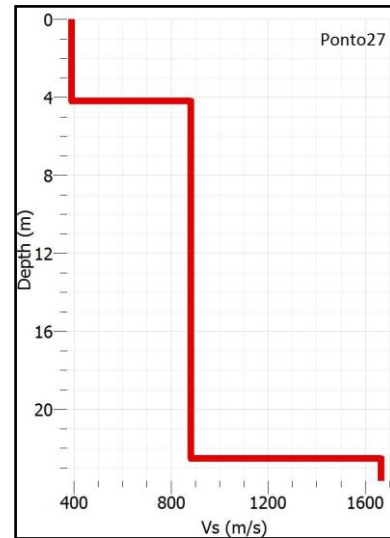
#### Ponto26

- Minimum misfit = 0,651989
- $V_{s1}$  (m/s) = 190,61
- Depth1 (m) = 4,67
- $V_{s2}$  (m/s) = 339,98
- Depth2 (m) = 78,25



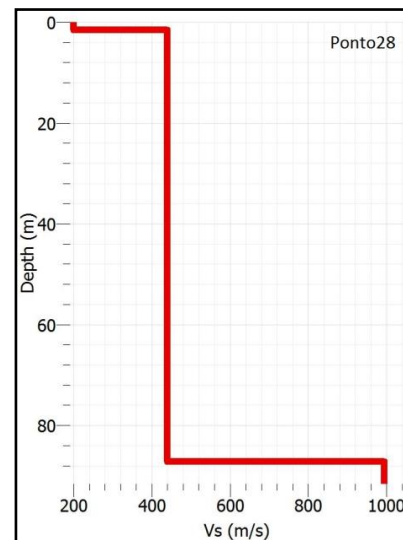
#### Ponto27

- Minimum misfit = 1,7731
- $V_{s1}$  (m/s) = 383,99
- Depth1 (m) = 4,29
- $V_{s2}$  (m/s) = 873,33
- Depth2 (m) = 22,64



#### Ponto28

- Minimum misfit = 0,917661
- $V_{s1}$  (m/s) = 194,37
- Depth1 (m) = 1,95
- $V_{s2}$  (m/s) = 433,87
- Depth2 (m) = 87,30



#### Ponto29

- Minimum misfit = 1,53892
- $V_{s1}$  (m/s) = 165,56
- Depth1 (m) = 2,80
- $V_{s2}$  (m/s) = 312,64
- Depth2 (m) = 17,07

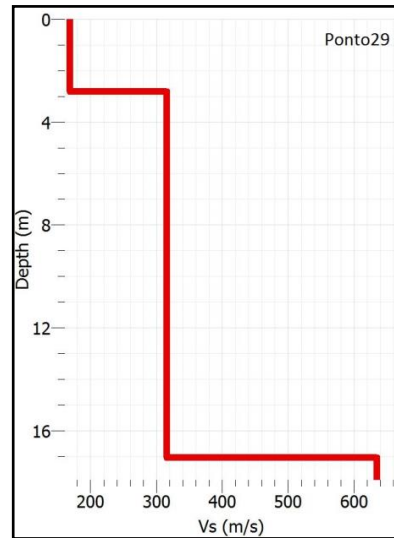


Gráfico 62 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 29.

#### Ponto30

- Minimum misfit = 1,13556
- $V_{s1}$  (m/s) = 161,70
- Depth1 (m) = 2,64
- $V_{s2}$  (m/s) = 292,38
- Depth2 (m) = 11,68

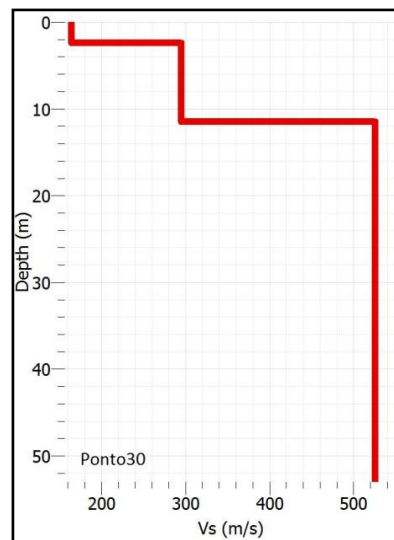


Gráfico 63 – Gráfico "Ground Profile" do ponto 30.

### 4.3. Quadro resumo de todos os resultados (Geopsy e Dinver)

Na tabela 6, estão reunidas as seguintes informações:

- Identificação do ponto amostrado (numérico de 1 a 30);
- Coordenadas (x, y) dos pontos amostrados;
- Valores de frequência fundamental (f0) em hertz;
- Valores de amplitude dos picos de frequência fundamental;
- Valores de velocidade de propagação das ondas S para duas camadas subterrâneas (Vs1 e Vs2);
- Valores de profundidade para dois limites entre camadas subterrâneas (Depth1 e Depth2).

*Tabela 6 – Compilação em quadro, dos principais resultados obtidos através dos softwares Geopsy e Dinver.*

Ponto	x	y	f0	A0	Vs1	Depth1	Vs2	Depth2
1	159173,47	464479,65	0,614549	2,77551	581,27	4,83	1091,20	27,63
2	159239,27	464486,07	5,09544	5,37235	186,65	2,24	289,61	14,44
3	158994,66	464115,07	0,855059	2,78488	356,43	2,10	468,57	93,95
4	159255,12	463943,94	0,584962	8,95198	786,92	9,05	1440,87	49,51
5	159211,1	464037,04	0,626276	2,76677	327,79	3,66	686,20	4,88
6	159105,01	464497,62	0,650522	1,6119	822,82	12,52	1625,36	84,21
7	159208,57	464500,74	1,34999	17,9233	264,08	5,76	467,28	96,44
8	159187,92	464144,84	0,763763	3,05729	361,10	4,25	860,12	22,34
9	159147,17	464071,95	2,96895	5,44156	191,35	2,04	452,13	9,50

<b>Ponto</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>f0</b>	<b>A0</b>	<b>Vs1</b>	<b>Depth1</b>	<b>Vs2</b>	<b>Depth2</b>
<b>10</b>	159112,96	464044,38	3,91008	4,8864	175,62	2,03	473,19	18,12
<b>11</b>	159173,78	464077,05	5,83473	7,84841	314,52	5,04	774,95	23,71
<b>12</b>	159199,12	464062,41	5,45554	3,89637	178,70	2,01	549,81	12,79
<b>13</b>	159171,39	464024,62	8,55032	6,06232	210,06	3,66	775,24	20,02
<b>14</b>	159188,75	464417,86	4,37272	3,0796	165,62	1,70	228,77	15,52
<b>15</b>	159302,03	464324,68	1,36852	1,78359	431,02	4,71	1024,90	20,02
<b>16</b>	159356,8	464236,76	7,61773	5,38508	303,66	5,12	723,50	20,30
<b>17</b>	159262,12	464027,81	4,73228	4,35914	473,23	7,80	799,88	40,98
<b>18</b>	159373,08	464102,78	4,89375	6,88386	386,60	2,71	780,95	41,69
<b>19</b>	159408,31	464147,31	4,68126	7,42893	152,78	2,11	240,65	14,85
<b>20</b>	159403,92	464195,77	6,31759	7,74225	374,63	5,66	858,75	41,14
<b>21</b>	159143,6	464227,15	4,25621	2,72645	723,42	12,45	1326,69	65,66
<b>22</b>	159185,31	464011,58	5,41356	2,95633	165,28	1,92	299,56	7,07
<b>23</b>	159390,59	464566,05	13,1695	2,03979	648,86	5,00	1170,49	19,54
<b>24</b>	159325,61	464622,25	0,631267	2,23979	301,58	3,91	569,55	87,30
<b>25</b>	159173,47	464479,65	8,51914	2,48823	242,68	3,01	436,82	12,05
<b>26</b>	159107,42	464220,57	0,85872	2,37304	190,61	4,67	339,98	78,25
<b>27</b>	158980,64	464193,51	1,12042	2,49454	383,99	4,29	873,33	22,64
<b>28</b>	158994,66	464115,07	0,708948	2,49746	194,37	1,95	433,87	87,30
<b>29</b>	159262,12	464027,81	5,30463	3,51422	165,56	2,80	312,64	17,07
<b>30</b>	159408,31	464147,31	4,89833	4,61753	161,70	2,64	292,38	11,68



#### 4.4. Mapas de interpolação dos resultados

Tendo-se procedido, como já foi referido, à construção de mapas de interpolação para as diferentes variáveis obtidas através dos gráficos HVSR e *Ground Profile*, seguem-se os mapas conseguidos.

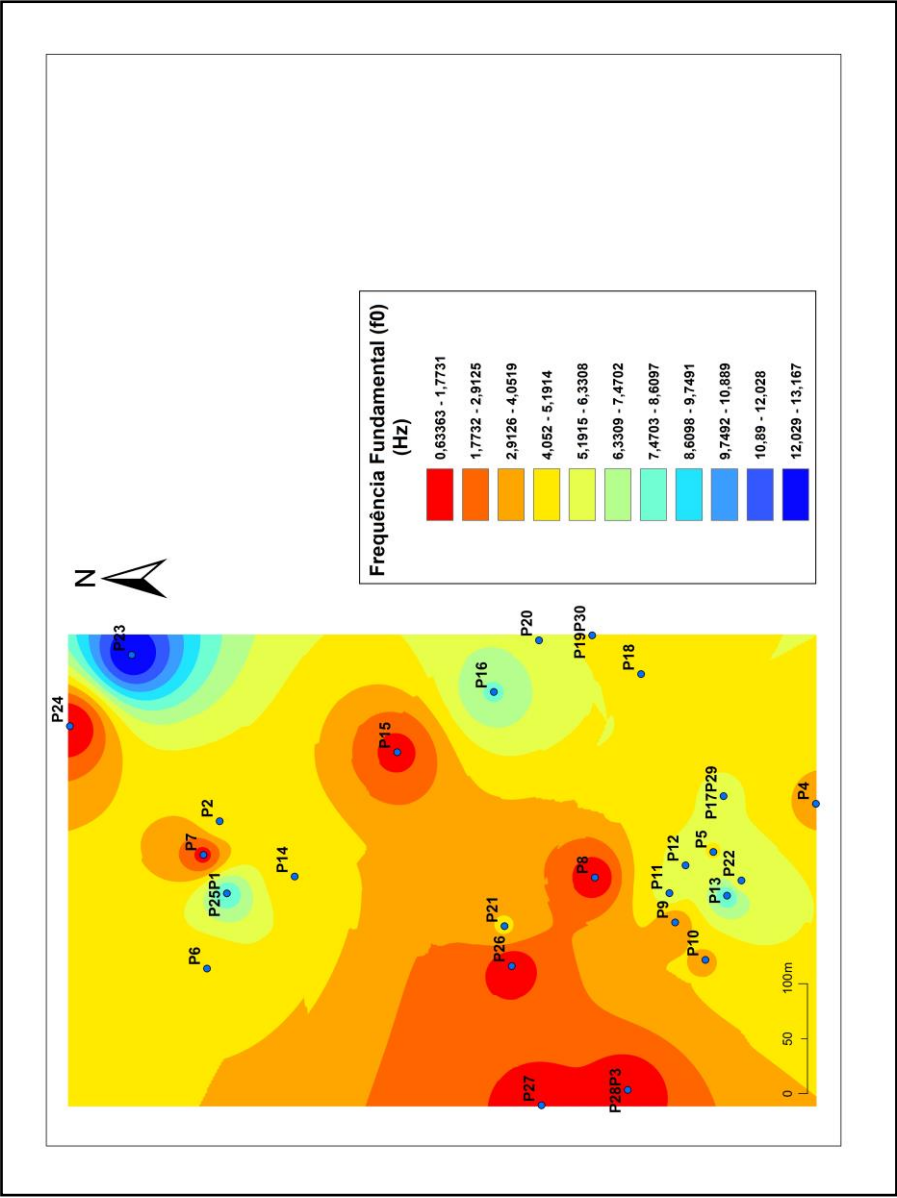


Figura 26 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado.

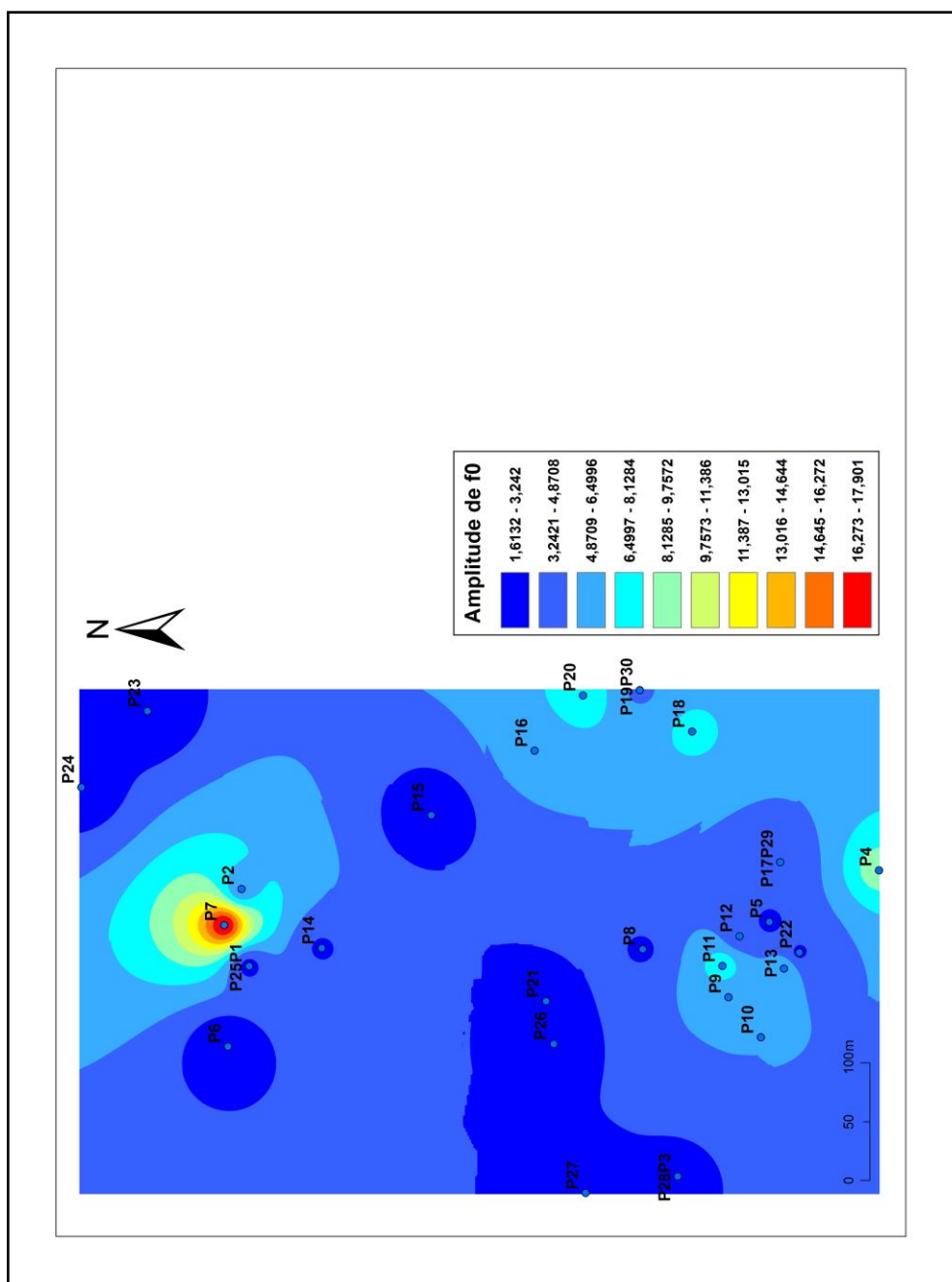


Figura 27 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores máximos de amplitude das ondas nos picos de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado.

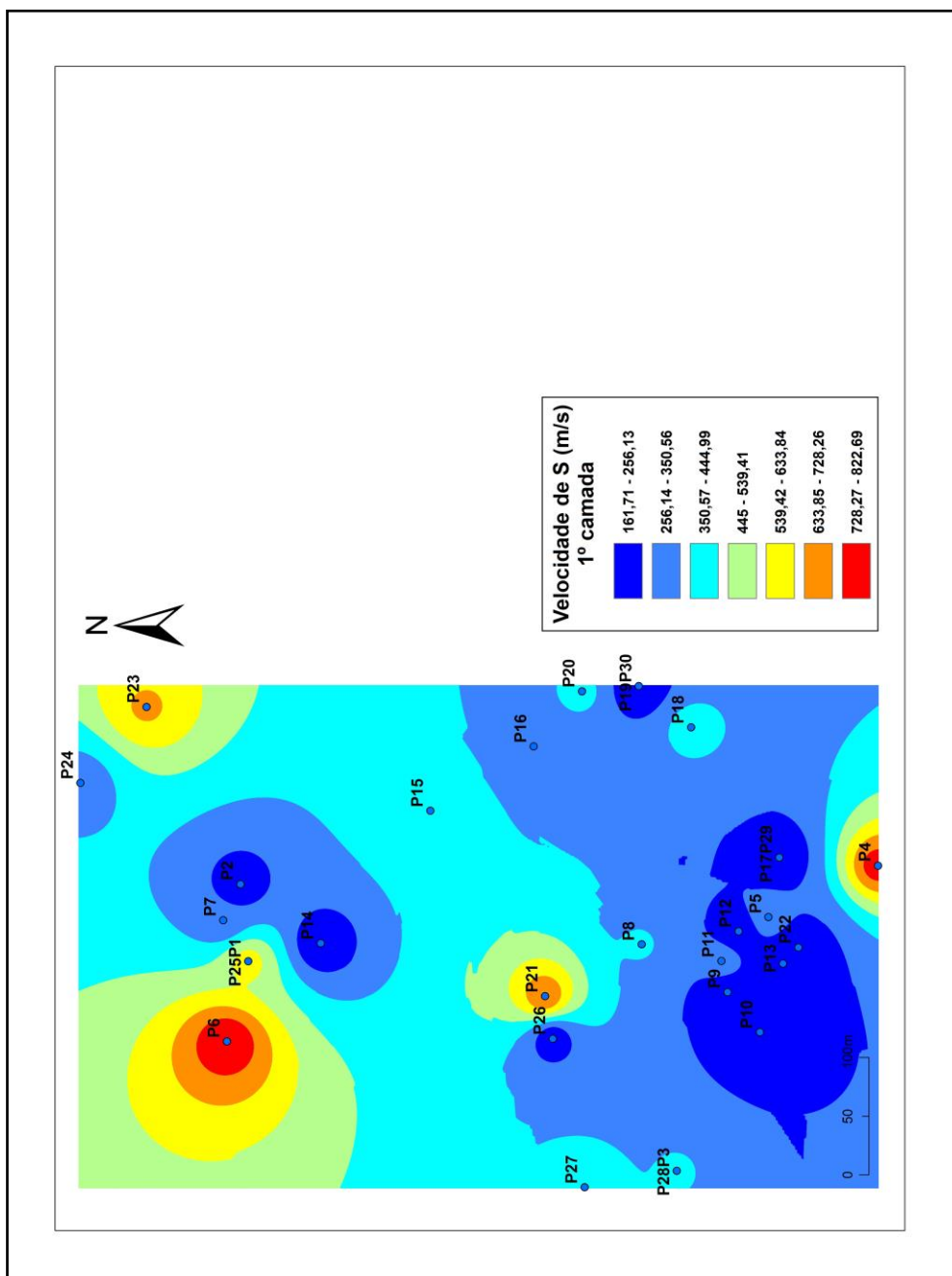


Figura 28 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores velocidade de propagação de S na primeira camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado.

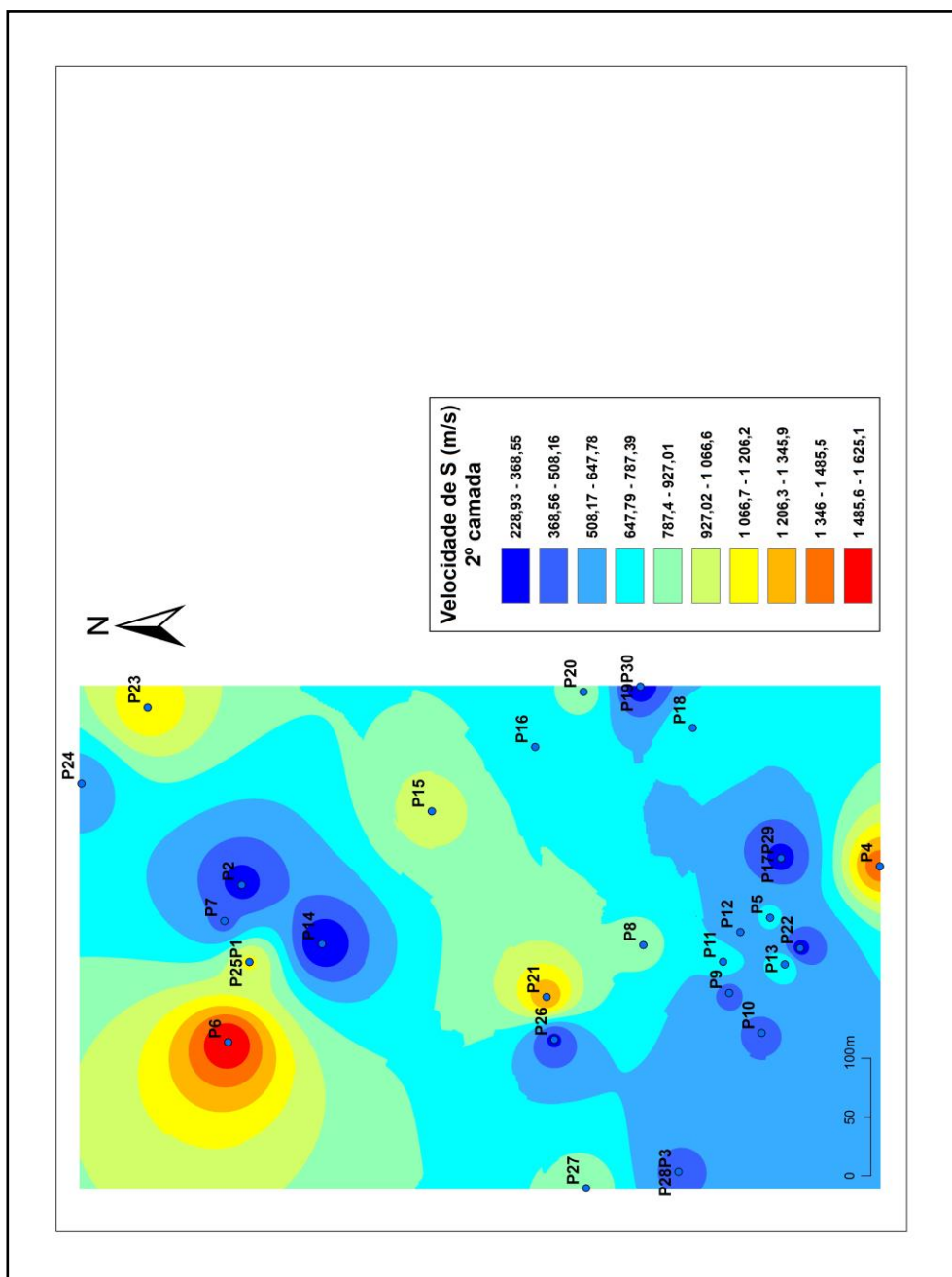


Figura 29 – Mapa de interpolação dos resultados para os valores de velocidade de propagação de S na segunda camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado.



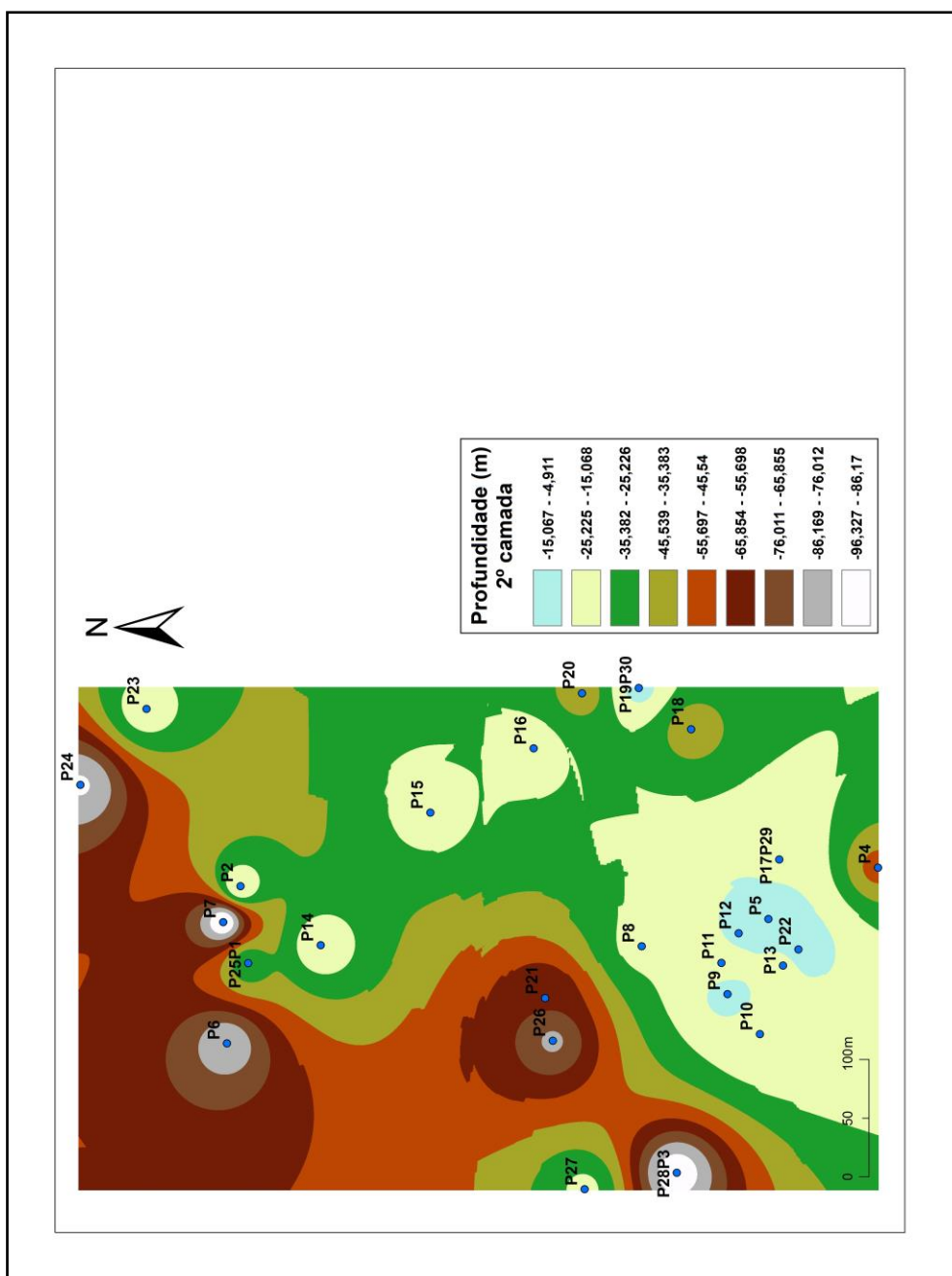


Figura 31 – Mapa de interpolação dos resultados dos valores de profundidade para o limite entre a segunda e a terceira camada de solo, obtidos em cada ponto amostrado.

#### 4.5. Resultados da modelação de terrenos em profundidade (TIN – Triangulated Irregular Surface)

Seguem-se os resultados de modelação dos terrenos da área amostrada:

- O primeiro modelo aqui apresentado corresponde à topografia superficial da área de estudo, construído através das cotas referentes a cada local amostrado (é de notar que este relevo e o relevo urbano podem não coincidir uma vez que a cidade se encontra em constante alteração);
- O segundo modelo corresponde ao cripto relevo da área amostrada, ou seja, se retirássemos a camada mais superficial do solo em toda a área, este seria o modelado do terreno, os valores aqui representados resultam da subtracção dos valores de profundidade obtidos através dos *ground profiles* aos valores de cota de cada local (estes valores estão sujeitos a uma margem de erro de alguns metros);
- O terceiro e último modelo corresponde ao mesmo tipo de relevo subterrâneo, mas neste caso seriam removidas a primeira e segunda camada mais superficial do solo, novamente os valores representados resultam da subtracção dos valores de profundidade obtidos através dos *ground profiles* aos valores de cota de cada local (estes valores estão sujeitos a uma margem de erro de alguns metros).

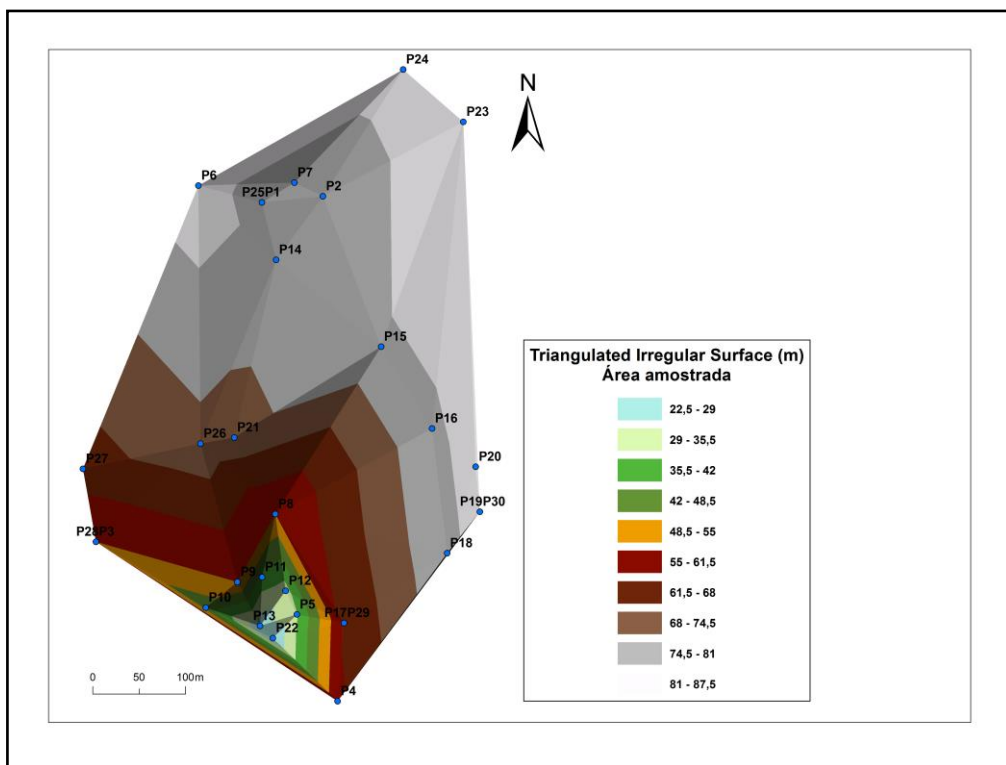


Figura 32 – Modelo digital de topografia representativo dos níveis de cota superficiais da área amostrada.

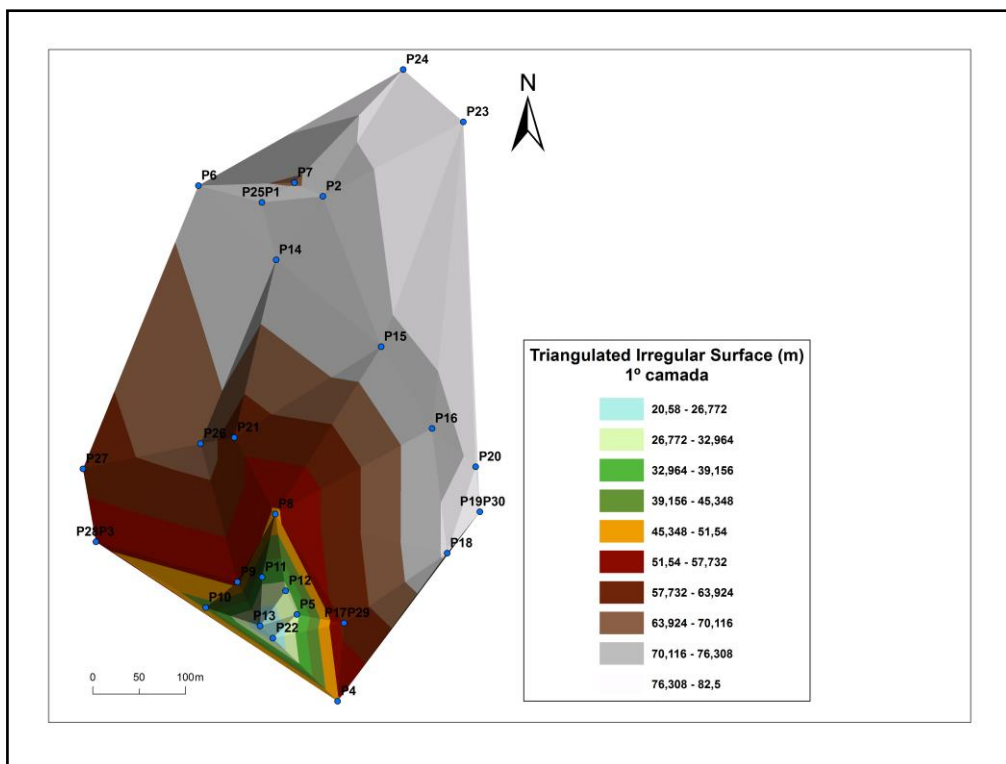
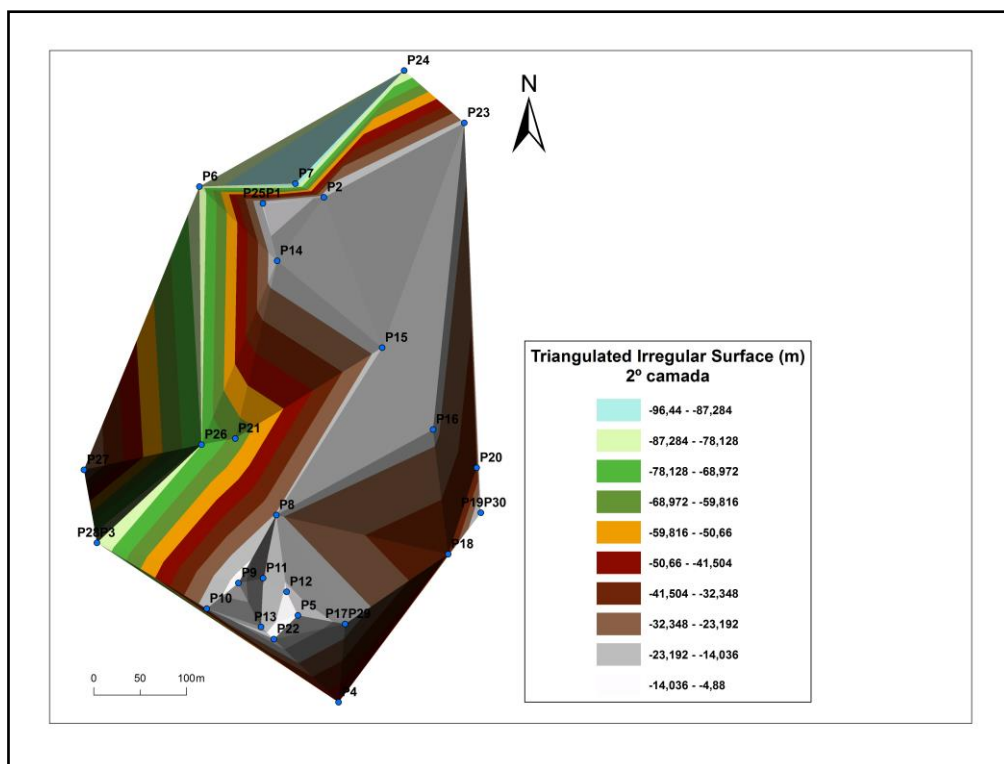


Figura 33 – Modelo digital de topografia representativa dos níveis de cota relativos à remoção da camada de solo mais superficial.

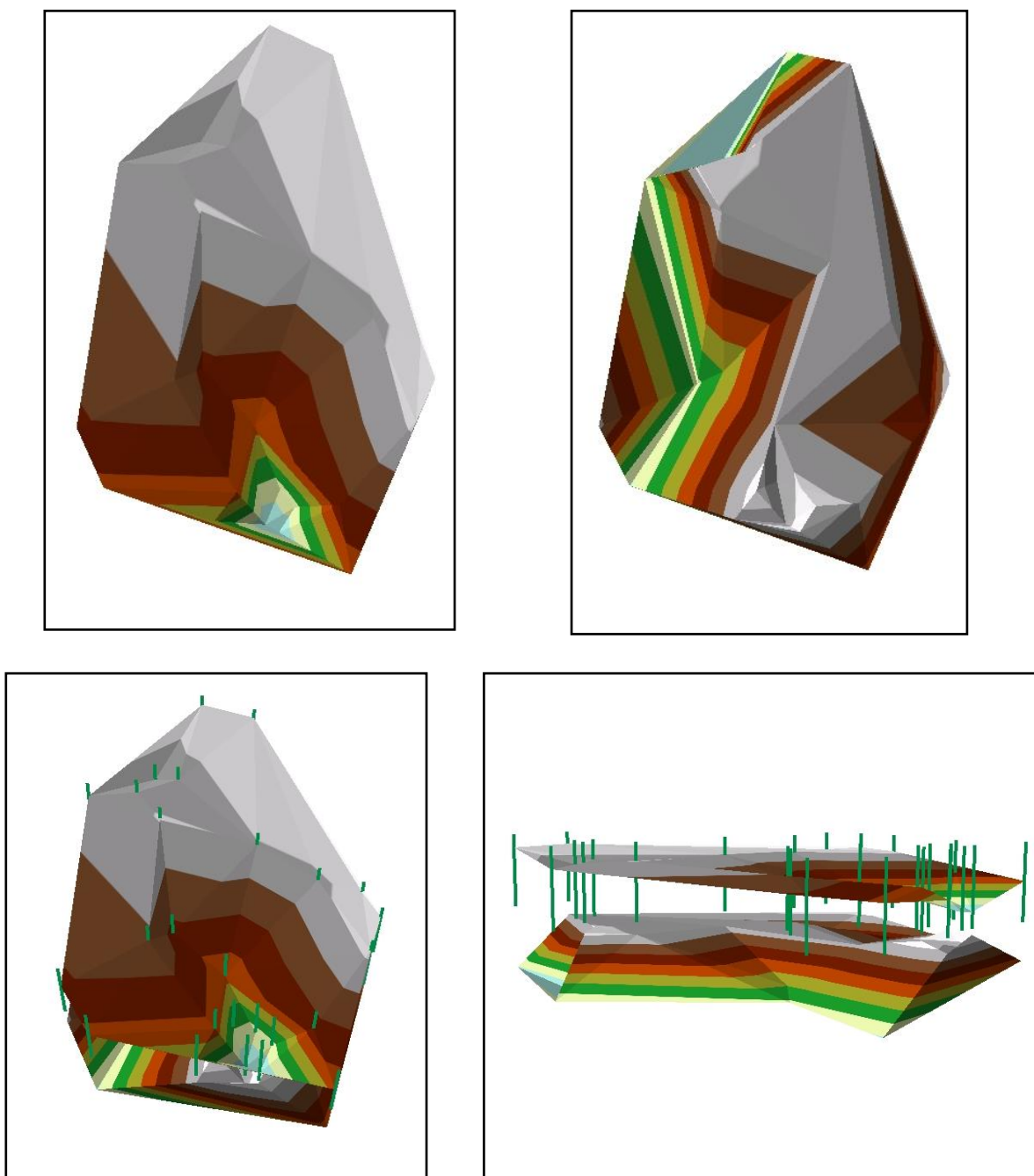




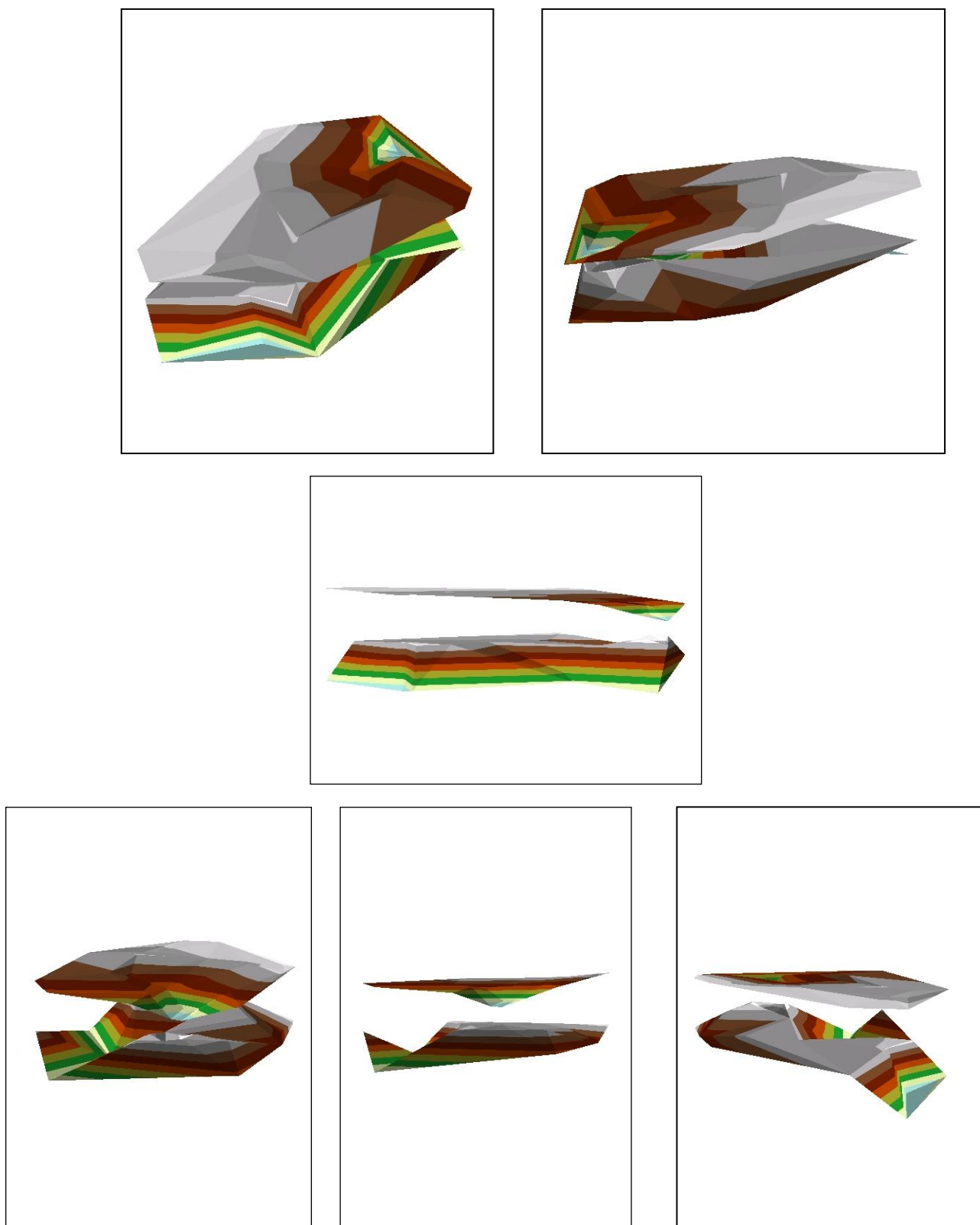
*Figura 34 – Modelo digital de topografia representativo dos níveis de cota relativos à remoção da primeira e segunda camada de solo.*

#### 4.6. Modelos 3D

Em ambiente ArcScene procedeu-se ao registo de diversos ângulos de visualização dos modelos apresentados anteriormente. Esta visualização 3D permite uma observação mais facilitada das diferenças entre os relevos das camadas subterrâneas do solo, e permite também observar a espessura de cada camada. Este tipo de exercício poderá funcionar como um indicador futuro de locais analisar mais pormenorizadamente. Uma vez que um dos factores de promoção de efeitos de sítio é uma grande espessura de camadas pouco resistentes ou sedimentares.



*Figura 35 – Diferentes ângulos de visualização dos modelos digitais topológicos. Os modelos superiores correspondem às figuras 33 e 34, (da esquerda para a direita). Os modelos inferiores incluem a localização dos vários pontos amostrados (barras verdes) e pode observar-se o espaço vazio entre limites de camada que corresponde à espessura de cada camada de solo.*



*Figura 36 – Complemento de visualização de vários ângulos dos modelos digitais topológicos apresentados nas figuras 33 e 34.*

#### **4.7. Correlação com as unidades geotécnicas**

Como já foi referido, na área de estudo podem encontrar-se as seguintes unidades geotécnicas:

- G1 – aterros;
- G2 – solos aluvionares e coluvionares;
- G4-G – solos residuais graníticos medianamente compactos;
- G8 – solos residuais graníticos compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade.

Analisando as características de cada unidade geotécnica, descritas na Carta Geotécnica do Porto, na escala 1:10 000, e ordenando essas unidades por graus de resistência teríamos a seguinte escala de unidades (da menos resistente para a mais resistente): G1, G2, G4-G e G8. Quanto mais compacta e mais resistente for a unidade, menor é a probabilidade de ocorrência de efeitos de sítio, sendo que o contrário também se verifica, quando menor a resistência da unidade, maior a probabilidade de ocorrência de amplificação das ondas sísmicas. Por outro lado, estando o território cartografado em termos de unidades geotécnicas, é possível fazer uma comparação entre os valores de frequência fundamental obtidos durante este estudo e aqueles que seriam expectáveis tendo em conta a unidade geotécnica presente. Unidades menos compactas demonstram frequências mais baixas enquanto unidades mais compactas apresentam valores mais elevados.

Neste sentido construiu-se uma tabela (tabela 7) de correlação entre os valores  $f_0$  obtidos e os expectáveis tendo em conta a cartografia geotécnica e graduou-se essa correlação por cores:

- Vermelho – má correlação entre o observado no estudo e o expectável;
- Laranja – correlação intermédia, o valor não é o esperado mas é aproximado;
- Verde – boa correlação entre o observado no estudo e o expectável.

*Tabela 7 – Quadro de correlação entre os valores de frequência fundamental obtidos em cada ponto amostrado e o valor expectável para a unidade geotécnica cartografada, escala de cores graduada (vermelho – má correlação, laranja – correlação intermédia, verde – boa correlação).*

Ponto	Latitude	Longitude	Frequência Fundamental (Hz)	Unidade Geotécnica	Correlação
1	41°8'54.40"N	8°37'10.09"W	8.32	G1	Vermelho
2	41°8'54.62"N	8°37'7.27"W	5.09	G1	
3	41°8'42.55"N	8°37'17.67"W	0.85	G8	
4	41°8'37.05"N	8°37'6.46"W	3.47	G4-G	Verde
5	41°8'40.06"N	8°37'8.37"W	5.11	G8	
6	41°8'54.97"N	8°37'13.03"W	4.29	G8	
7	41°8'55.09"N	8°37'8.59"W	1.34	G2	
8	41°8'43.55"N	8°37'9.39"W	0.76	G8	Vermelho
9	41°8'41.18"N	8°37'11.12"W	2.96	G8	Laranja
10	41°8'40.28"N	8°37'12.58"W	3.91	G8	
11	41°8'41.35"N	8°37'9.98"W	5.83	G8	Verde
12	41°8'40.88"N	8°37'8.89"W	5.45	G8	
13	41°8'39.65"N	8°37'10.07"W	8.55	G8	
14	41°8'52.40"N	8°37'9.42"W	4.37	G1	Vermelho
15	41°8'49.40"N	8°37'4.54"W	1.36	G8	
16	41°8'46.56"N	8°37'2.17"W	7.61	G4-G	Verde
17	41°8'39.77"N	8°37'6.18"W	4.73	G4-G	
18	41°8'42.22"N	8°37'1.44"W	4.89	G4-G	
19	41°8'43.67"N	8°36'59.94"W	4.68	G4-G	

Ponto	Latitude	Longitude	Frequência Fundamental (Hz)	Unidade Geotécnica	Correlação
20	41°8'45.24"N	8°37'0.14"W	6.32	G4-G	Verde
21	41°8'46.21"N	8°37'11.31"W	4.26	G8	
22	41°8'39.23"N	8°37'9.47"W	5.41	G8	
23	41°8'57.24"N	8°37'0.80"W	13.17	G4-G	Amarelo
24	41°8'59.05"N	8°37'3.60"W	0.63	G8	Vermelho
25	41°8'54.40"N	8°37'10.09"W	8.51	G1	
26	41°8'45.99"N	8°37'12.86"W	0.86	G8	
27	41°8'45.09"N	8°37'18.29"W	1.12	G8	
28	41°8'42.55"N	8°37'17.67"W	0.71	G8	
29	41°8'39.77"N	8°37'6.18"W	5.30	G4-G	Verde
30	41°8'43.67"N	8°36'59.94"W	4.89	G4-G	

A relação entre frequência fundamental ( $f$ ) e velocidade de S ( $V_s$ ) encontra-se expressa da seguinte forma (Equação 1):

$$f = V_s / 4h$$

Onde ( $V_s$ ) corresponde à velocidade média da onda S na camada sedimentar e ( $h$ ) corresponde à espessura da camada. Esta relação é de consenso geral e tem vindo a ser utilizada e demonstrada por diversos autores em projectos relacionados com a metodologia HVSr (Lermo & Chavez-Garcia, 1993, 1994; Lachet & Bard, 1994; Bard, 1998; Ibs-von Seht & Wohlenberg, 1999; Fah et al., 2001; em Castellaro & Mulargia, 2009).

Estando a frequência ( $f$ ) relacionada com a velocidade de S ( $V_s$ ), por outro lado,

a velocidade de S ( $V_s$ ) está relacionada com a competência mecânica das unidades geotécnicas ( $G_0$ ). No decorrer do subprojecto GEORISK, já aqui citado, procedeu-se a uma actualização da cartografia geotécnica da cidade do Porto com base em novos elementos recolhidos (Sousa et al., 2008), sendo um desses elementos o módulo de deformabilidade ( $G_0$ ) do solo (Equação 2):

$$G_0 = V_s \times \rho$$

Onde ( $V_s$ ) corresponde à velocidade de S e ( $\rho$ ) corresponde à densidade. O módulo de deformabilidade aqui expresso representa a propriedade que governa a resposta do solo à acção sísmica (Sousa *et al.*, 2008).

A relação entre a geologia superficial e os valores de frequência fundamental tem vindo a ser explorada por outros autores no sentido de correlacionar as duas propriedades, é o caso de Gok & Polat, 2012, num estudo para a cidade de Bursa, no noroeste da Turquia. Tal como a relação aqui apresentada, no estudo citado os autores constataram uma relação entre valores de frequência mais baixos e a existência de camadas superficiais sedimentares e valores de frequência mais altos para formações superficiais de rocha metamórfica (Gok & Polat, 2012).

## Capítulo 5 – Discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentadas as considerações sobre os resultados obtidos para os pontos amostrados. A principal análise a ser feita de todos os resultados obtidos e apresentados anteriormente, tem a ver com a correlação entre os valores de frequência fundamental e as unidades geotécnicas cartografadas.

De facto, em vários pontos (como é o caso dos pontos 3, 8, 14, 15, 24, 25, 26, 27 e 28) os valores de  $f_0$  obtidos pelo método HVSR e o que seria de esperar tendo em conta a cartografia geotécnica, representa uma má correlação entre o observado e o expectável. Em alguns casos, a análise dos gráficos *ground profiles*, ajuda a formular uma hipótese para este desparamento de resultados. A pouca espessura das unidades geotécnicas mais superficiais resulta numa leitura de frequência da unidade inferior, e por isso, em casos onde seriam expectáveis baixas frequências e se verificam valores mais elevados, essa explicação entra em consideração.

Por outro lado, verificam-se em alguns caso, especificamente nos pontos 3, 8, 15, 24, 26, 27 e 28 que a leitura da frequência fundamental é muito baixa para locais onde se supões a existência de solos residuais graníticos mais compactos. Nestes casos pode considerar-se a existência de erros na cartografia geotécnica, tendo em conta que esta é feita com base em observações pontuais, na maioria dos casos durante a execução de obras públicas, podem haver manchas de unidades geotécnicas que não chegaram a ser efectivamente observadas. Nestes locais podem ocorrer pequenas manchas de depósitos sedimentares não cartografados.

Relativamente aos mapas de interpolação, através de uma observação visual, parece poder perceber-se a tendência de alinhamentos de valores semelhantes. No entanto, não foi possível no decorrer deste estudo compreender a causa destes alinhamentos. Esta observação pode, futuramente servir como indicador para a realização de estudos mais pormenorizados nestes locais de modo a perceber se a espessura observada corresponde à realidade, e nesse caso, quais as suas implicações e os factores que levaram a tal acumulação.



## Conclusão

Em conclusão, para a cidade do Porto, onde a técnica HVSR nunca foi aplicada, este projecto veio contribuir com valores sobre as frequências fundamentais inerentes a cada local da área amostrada. A área de estudo regeu-se pelos limites da bacia hidrográfica do Rio Frio e os pontos analisados foram escolhidos com base em aspectos naturais (topografia, linhas de água, etc.) e aspectos de natureza antrópica (existência de serviços públicos de grande importância: hospital, tribunal, universidade, etc.).

Os resultados obtidos através da metodologia HVSR foram comparados com a informação presente na Carta Geotécnica do Porto na procura de complementar informação, quer ao nível da fiabilidade da metodologia, quer ao nível da possível correcção da cartografia. Isto vem fomentar o interesse num possível estudo futuro mais pormenorizado, pois de facto observaram-se incongruências entre os resultados e a cartografia já existente.

Foram também construídos mapas de interpolação dos resultados e modelos digitais da topografia subterrânea da área de estudo. Esta análise espacial não pode ser entendida como um resultado de grande precisão mas permite uma visualização aproximada daquele que pode ser o cripto relevo do subsolo. Esta aplicação da metodologia HVSR para a construção de modelos digitais de cripto relevo é inovadora dentro da área, não existem estudos com aplicações semelhantes. Este facto abre possibilidades de exploração do método para aplicações de cartografia digital.

## Referências bibliográficas

- Assunção, C. F. (1973). *Curso de Geologia. Ciclo complementar do ensino secundário liceal*. (M. d. Nacional, Ed.) Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies - A literature review. *Earth-Science Reviews*, 205-227.
- Borges, J. F., Fitas, A., Bezzeghoud, M., & Teves-Costa, P. (2001). Seismotectonics of Portugal and its adjacent Atlantic area. *Tectonophysics*, 373-387.
- Cabral, J., & Ribeiro, A. (1989). *Carta Neotectónica de Portugal na escala 1:1000000 - nota explicativa*. Lisboa, Portugal: Serviços Geológicos de Portugal.
- Castellaro, S., & Mulargia, F. (2009). Estimates Of Vs30 Based On Constrained H/V Ratio Measurements Alone. Em M. Mucciarelli, M. Herak, & J. Cassidy (Edits.), *Increasing Seismic Safety By Combining Engineering Technologies And Seismological Data. NATO Science For Peace And Security Series - C: Environmental Security* (Vol. XVII, pp. 85-98). Ed. Springer.
- Câmara Municipal do Porto. (2003). *Carta Geotécnica do Porto na escala 1:10000*. Porto, Portugal: Câmara Municipal do Porto.
- Câmara Municipal do Porto. (2003). *Carta Geotécnica do Porto. Volume I - Notícia Explicativa e Cartas*. Porto, Portugal: Câmara Municipal do Porto.
- Costa, J. C., & Teixeira, C. (1957). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000. Notícia Explicativa da Folha 9-C (Porto)*. Lisboa, Portugal: Serviços Geológicos de Portugal.
- Costa, J. C., Teixeira, C., & Medeiros, A. C. (1957). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 - Folha 9-C (Porto)*. Lisboa, Portugal: Serviços Geológicos de Portugal.
- Faccioli, E., Vanini, M., & Frassiné, L. (2002). "Complex" site effects in earthquake ground-motion, including topography. *Conferência 12th European Conference on Earthquake Engineering*. Londres, Reino Unido.
- Gök, E., & Polat, O. (2012). Microtremor HVSR Study Of Site Effects In Bursa City (Northern Marmara Region, Turkey). (S. D'Amico, Ed.) *Earthquake Research and Analysis - New Frontiers in Seismology*, 225-236.
- Instituto Nacional de Estatística: INE. (2011). *Censos*. Lisboa, Portugal: Instituto Nacional de Estatística.

- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 228-241.
- Landim, P. M. (2000). *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. Obtido em 2016/2017, de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Lima, F. C. (1998). *Introdução à Sismologia*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Mariotti, M., & Sbirrazzuoli, R. (2009). *Guida all'uso di GEOPSY per elaborazioni HVSr e MASW*. Itália: SARA electronic instruments srl.
- Musset, A. E., & Khan, M. A. (2000). *Looking Into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nakamura, Y. (2008). On the H/V Spectrum. *Conferência The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Noronha, F. (2006). Especialização metalogenética das rochas graníticas da ZCI. *VII Congresso Nacional de Geologia*, (pp. 1239-1241). Évora, Portugal.
- Panou, A., Theodoulidis, N., Hatzidimitriou, P. M., Savvaidis, A., & Papazachos, C. (2005). Reliability of Ambient Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio in Urban Environments: The Case of Thessaloniki City (Northern Greece). *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 162.
- Pacific Northwest Seismic Network: PNSN. (s.d.). *Site Effects / Pacific Northwest Seismic Network*. Obtido em 2016/2017, de <https://pnsn.org/outreach/earthquakehazards/site-effects>
- Ribeiro, A., Pereira, E., & Severo, L. (1980). Análise da deformação da zona de cisalhamento Porto-Tomar na transversal de Oliveira de Azeméis. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 3-9.
- SARA Electronic Instruments. (s.d.). *SR04S3 Geobox*. Obtido em Setembro a Dezembro de 2016, de [http://www.sara.pg.it/documents/commercial/SR04\\_GEOBOX\\_DATASHEET\\_ENG.pdf](http://www.sara.pg.it/documents/commercial/SR04_GEOBOX_DATASHEET_ENG.pdf)
- SESAME. (2005). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*. SESAME European Research Project, deliverable D23.12.
- Sousa, M., Moura, R., Fernandes, I., Cunha, M., Afonso, D., Paulo, J., . . . Borges, L. (2008). GEORISK - Riscos geológicos, património e sistemas de informação geográfica. *Congresso Nacional de Geotecnia; IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*. Coimbra, Portugal.

- Teves-Costa, P., Almeida, I. M., Rodrigues, I., Matildes, R., & Pinto, C. (2014). Geotechnical characterization and seismic response of shallow geological formations in downtown Lisbon. *Annals of Geophysics*, Vol. 57, S0436.
- Teves-Costa, P., Oliveira, C. S., & Senos, M. L. (2007). Effects of local site and building parameters on damage distribution in Angra do Heroísmo - Azores. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, 986-999.
- Warnana, D. D., Soemitro, R. A., & Utama, W. (2011). Application of microtremor HVSR method for assessing site effect in residual soil slope. *International Journal of Basic & Applied Sciences*, Vol. 11, 73-78.